

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до курсового проектування з курсу “Твердотільна електроніка-2”

(для підготовки бакалаврів за напрямком 6.050801 «Мікро- та наноелектроніка»)

Київ 2014

Методичні вказівки до курсового проектування з курсу “Твердотільна електроніка-2” (для підготовки бакалаврів за напрямком 6.050801 «Мікро- та наноелектроніка»). Укл. Ільченко В.І., Королевич Л.М., Коваль В.М. – Київ, 2014. – 52 с.

Укладачі: к.т.н. Ільченко Валентин Іванович,
Королевич Любомир Миколайович,
к.т.н. Коваль Вікторія Михайлівна

Рецензент: к.т.н. Вунтесмері Ю.В.

Рекомендовано кафедрою мікроелектроніки,
протокол №15 від 21.05.2014 р.

1. ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ЩОДО ВИКОНАННЯ, ОФОРМЛЕННЯ ТА ЗАХИСТУ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Курсове проектування – завершальний етап вивчення теоретичної частини курсу. При виконанні курсової роботи студент набуває навиків самостійного розв’язку інженерних задач мікроелектроніки, роботи з технічною і довідковою літературою.

Курсова робота з курсу “Твердотільна електроніка” представляє собою розрахунок вузла інтегральної схеми, розробку її топологічного креслення та ескізів фотошаблонів, а також технології її виготовлення по заданій електричній схемі.

Тематика курсових робіт визначається програмою курсу “Твердотільна електроніка”. Для розробки пропонуються напівпровідникові інтегральної схеми на польових транзисторах.

Завдання на курсову роботу містить назву теми, принципову електричну схему вузла, який має бути виконаний у інтегральному вигляді, перелік електричних та технологічних параметрів мікросхеми.

Курсова робота складається із пояснювальної записки та графічної документації. Розрахунково-пояснювальна записка представляє собою текстовий конструкторський документ, оформлений у відповідності до вимог ДСТУ 2.105-79 і ДСТУ 2.106-68. Вона має бути виконана акуратно і грамотно на одній стороні листа білого паперу. Загальний об’єм записки – 20-25 листів формату А4 за ДСТУ 2.301-68.

Графічна документація курсового проекту складається із одного топологічного креслення формату А2 та ескізів фотошаблонів основних технологічних етапів виготовлення напівпровідникової інтегральної мікросхеми формату А3.

Завершена і підписана студентом пояснювальна записка здається керівнику не пізніше ніж за 5 днів до захисту курсової роботи.

Графічна документація роботи перевіряється та підписується керівником після перевірки пояснювальної записки, але не пізніше ніж за один день до терміну захисту.

Після перевірки пояснювальної записки керівник пише короткий відгук (можна на лицевій або на зворотній стороні титульного листа).

Пояснювальна записка, повернена студенту на доопрацювання, представляється на перевірку вдруге з попереднім відгуком керівника.

Якщо виявиться, що робота виконана студентом не самостійно, йому видається повторне завдання.

Студент захищає курсовий проект перед комісією у складі керівника проекту та членів комісії, призначених завідуючим кафедрою. Час, місце та порядок явки на захист студентів затверджується заздалегідь.

При захисті проекту студент повинен проаналізувати запропоновану в роботі схему, обґрунтувати вибір інтегральних елементів і технологічного процесу та показати особливості побудови топологічного креслення, відповісти на основні питання членів комісії. На доповідь відводиться 10 хвилин.

Роботу над курсовим проектом доцільно проводити в наступній послідовності:

1. Вивчити завдання на курсове проектування.
2. Скласти бібліографію для роботи над курсовим проектом.

При складенні бібліографії варто використовувати не лише основну літературу, вказану керівником, але й знайти додаткову в бібліотечних каталогах. Повний список літератури узгодити з викладачем. Працюючи над джерелами літератури, необхідно в робочий зошит заносити їх повну назву, прізвище та ініціали автора, видавництво, місце та рік видання, шифр бібліотеки. Рекомендується вказувати сторінки, які використані в роботі, а в окремих випадках складати анотації до них. Це дозволяє легко орієнтуватися в джерелах літератури та швидко знаходити потрібну книгу, статтю, посилання.

3. Скласти календарний план роботи над проектом і узгодити його з керівником.

На виконання курсового проекту відводиться 12-14 тижнів: перші 2 тижні – для організаційної роботи, а останні три-чотири тижні – для оформлення і захисту проекту.

4. Проаналізувати інтегральну схему, а саме: наявні елементи схеми та їх тип, розрахувати коефіцієнт складності мікросхеми, виділити структурні частини схеми та встановити їх призначення, побудувати логічний аналог схеми та скласти таблицю істинності, записати логічну функцію, яку виконує дана схема.
5. Розрахувати окремі елементи схеми, а саме: порогову напругу всіх МДН-транзисторів, на основі чого їх геометричні розміри, а також розрахувати пристрої захисту від високих напруг на входах схеми та їх геометричні розміри.
6. Розробити і обґрунтувати оптимальну технологію виготовлення схеми.
7. Виходячи з правил побудови і конструктивно-технологічних обмежень на розробку топології мікросхем, а також розрахованих вище геометричних розмірів, виконати топологічне креслення.
8. На основі розробленого технологічного маршруту та топологічного креслення побудувати ескізи фотошаблонів для виготовлення даної мікросхеми.
9. Оформити пояснювальну записку.
10. Оформити графічну документацію проекту.

В процесі завершення окремих етапів роботи варто консультуватись із керівником роботи.

1.1.Зміст і оформлення пояснювальної записки курсової роботи

Пояснювальна записка курсової роботи складається з наступних розділів:

1. Вступ.
2. Технічне завдання на проектування.
3. Аналіз схеми.
4. Розрахунок інтегральних компонентів схеми.
5. Таблиця розмірів елементів схеми.
6. Технологія виготовлення МДН ІС.
7. Висновки.
8. Топологічне креслення.
9. Фотошаблони.
10. Список літератури.

У висновку проводиться підсумок виконаної роботи. Аналізуються результати проектування топологічної схеми і даються рекомендації щодо покращення топології або технології розглянутої інтегральної схеми.

В список літератури включається література, якою студент користувався у процесі роботи і на яку в тексті пояснювальної записки є посилання. Літературні джерела вказуються в порядку їх використання у тексті.

Вказується прізвище та ініціали автора (авторів), назва книги або статті (назва журналу, рік видання, том, номер), місце видання, видавництво та рік видання. Допускаються загальноприйняті скорочення найменувань журналів, видавництв, міст. Іноземні роботи приводяться у оригінальній транскрипції.

Пояснювальну записку друкують шрифтом Times New Roman, 12 кеглем, з 1,5 міжрядковим інтервалом. Відступи від краю сторінки (поля), мм: зверху – 20; зліва – 20; справа – 10; знизу – 20. Курсову роботу скріплюють за допомогою скорозшивача з першою прозорою сторінкою. Приклад титульного аркушу наведено у Додатку 1.

Всі листи пояснювальної записки, окрім титульного, повинні мати наскрізну нумерацію. Ілюстрації та таблиці повинні мати тематичні найменування та пояснювальний текст. Підписи до малюнків розташовуються під зображенням, підписи до таблиць – над таблицями.

Кожний розділ пояснювальної записки повинен розпочинатись із нового листа і повинен мати порядковий номер, записаний арабськими цифрами з крапкою, і відповідний заголовок. Великі розділи варто розбити на підрозділи з номерами та заголовками. Нумери підрозділів записуються перед заголовками і складаються з номерів розділу та підрозділу, розділених крапкою.

Заголовки розділів варто записувати прописними буквами, підрозділів – рядковими з першої прописної. Переноси слів у заголовках не допускаються, в кінці заголовка крапка не ставиться, від попереднього тексту заголовков пишуть на відстані 15 мм, а від наступного – не менше 10 мм.

Пояснювальну записку слід викладати чітко, коротко, обґрунтовуючи вибрані рішення. Топологія, визначення, позначення, одиниці використаних величин мають бути єдиними. Скорочення слів у тексті і підписах під ілюстраціями не допускаються, крім скорочень, встановлених ДСТУ 2.316-68. Умовні буквені позначення величин і умовні графічні позначення повинні відповідати встановленим стандартам.

У формулах в якості символів необхідно застосовувати лише позначення, встановлені відповідними стандартами. Значення символів і коефіцієнтів, що входять у формулу, наводять безпосередньо під формулою, з нового рядка в тій послідовності, в якій вони записані у формулі; після формули ставиться кома, а перший рядок розшифрування починається словами “де” без двокрапки; кожен рядок розшифрування закінчується крапкою з комою, а останній – крапкою.

Наприклад: мінімальну ширину резистора обчислюємо за формулою

$$W_p = \sqrt{\frac{\rho_s P}{R P_0}}, \quad (1)$$

де $\rho_s = 200 \text{ Ом}$ – поверхневий опір; $P = 0,5 \text{ Вт}$ – потужність розсіювання резистора; $R = 40 \text{ кОм}$ – номінальне значення опору; $P_0 = 40 \text{ Вт/см}^2$ – допустима потужність розсіювання.

Якщо за однією формулою виконується декілька однакових обчислень, доцільно детальний розрахунок проводити один раз, а результати решти розрахунків представити у вигляді таблиць.

Всі формули пояснювальної записки повинні мати наскрізну нумерацію арабськими цифрами в круглих дужках, які проставляються по правому краю тексту.

В пояснювальній записці обов’язкові посилання на літературу, технічні умови, стандарти і інші документи, на основі яких приймається той чи інший технічний розв’язок, виконується розрахунок і т.д. Окрім цього, в тексті приводяться посилання на формули, малюнки, таблиці.

Наприклад: “... у формулі (2)”
“... (див. рис. 10)”
“... (див. табл. 1)”.

1.2.Зміст та оформлення графічної документації курсової роботи

Типова графічна документація курсового проекту складається із одного листа формату А2 креслення топологічної схеми та ескізів фотошаблонів формату А3, кількість яких визначається кількістю фотолітографій у розробленому технологічному маршруті. Рекомендуються масштаби 100:1; 200:1; 500:1.

Вихідними даними для розробки топології є електричні, конструктивні та технологічні дані. Електричні дані: принципова електрична схема; вимоги до електричних параметрів; перелік активних і пасивних елементів схеми, їх параметрів та допусків. Конструктивні дані: розміри і допуски при дифузійних процесах; розміри і допуски при фотолітографічних процесах; типова топологія активних і пасивних компонентів; типові розміри підкладок; розташування контактних площадок. Вихідні технологічні дані: тип інтегральної схеми; вибір матеріалу підкладки; ізоляція елементів у ІС; типовий технологічний процес.

При розробці топологічного креслення мінімізують кількість перетинів провідників, довжину між компонентних з’єднань, а окремі компоненти прагнуть розташувати так, щоб при дотриманні вимог мінімального віддалення компонентів зберігалась їх максимально щільна упаковка. Якщо після розміщення всіх компонентів на підкладці вибраного розміру

залишилась невикористана площа, рекомендується повторити побудову схеми на підкладці меншого розміру.

Топологічне зображення представляє собою вигляд зверху заданої мікросхеми. Проектувати топологічне креслення рекомендується в прямокутній системі координат. Окремі елементи топології представляють собою замкнені фігури зі сторонами, паралельними до осей координат. Шари металізації та контактні площадки вибирають при проектуванні мінімально допустимими, а відстані між ними, по можливості, максимальними.

Кожен шар напівпровідникової інтегральної схеми, що створюється у одному технологічному циклі, розфарбовується у свій колір або відтіняється різною штриховкою.

На топологічному кресленні проставляються тільки габаритні розміри підкладки та позначення контактних площадок. Крім власне топологічного зображення мікросхеми топологічне креслення містить довільний розріз мікросхеми та легенду. Довільний розріз мікросхеми виконується в місці активного елементу (транзистора), а легенда представляє собою таблицю з описом всіх шарів у довільному розрізі мікросхеми, включаючи умовне позначення, назву та товщину шарів. Приклад побудови довільного розрізу мікросхеми наведено на рис.31, м.

Ескізи фотошаблонів будуються шляхом перенесення зображення шару, який створюватиметься під час фотолітографії за допомогою даного фотошаблону, з топологічного креслення на окремий лист. Області кристалу, які в результаті фотолітографічного процесу залишаться без змін, замальовують штриховкою, виконаною під кутом 45°.

Графічну документацію виконують у друкованому вигляді за допомогою графічних програм (наприклад, AutoCAD), допускається виконання креслень від руки. Основний напис креслень розташовується у правому нижньому куті листа, приклади заповнення якого наведено у Додатку 2.

2. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПОРОГОВОЇ НАПРУГИ МДН-ТРАНЗИСТОРА

2.1. Розрахунок порогової напруги МДН-транзистора з індукованим каналом

Пороговою напругою МДН-транзистора з індукованим каналом прийнято вважати напругу на його затворі, при якій кількість носіїв у каналі стає рівною кількості основних носіїв у підкладці. При цьому поверхневий потенціал на межі розділу $Si-SiO_2$ рівний подвоєному значенню рівня Фермі у об'ємі напівпровідника. На рис. 4 зображені профілі домішок і відповідні їм зонні діаграми поверхневої області кремнію для транзистора з індукованим каналом з однорідним і неоднорідним розподілом домішок і для транзистора з вбудованим каналом відповідно. Пунктиром показаний реальний розподіл домішок, а суцільною лінією – східчаста апроксимація.

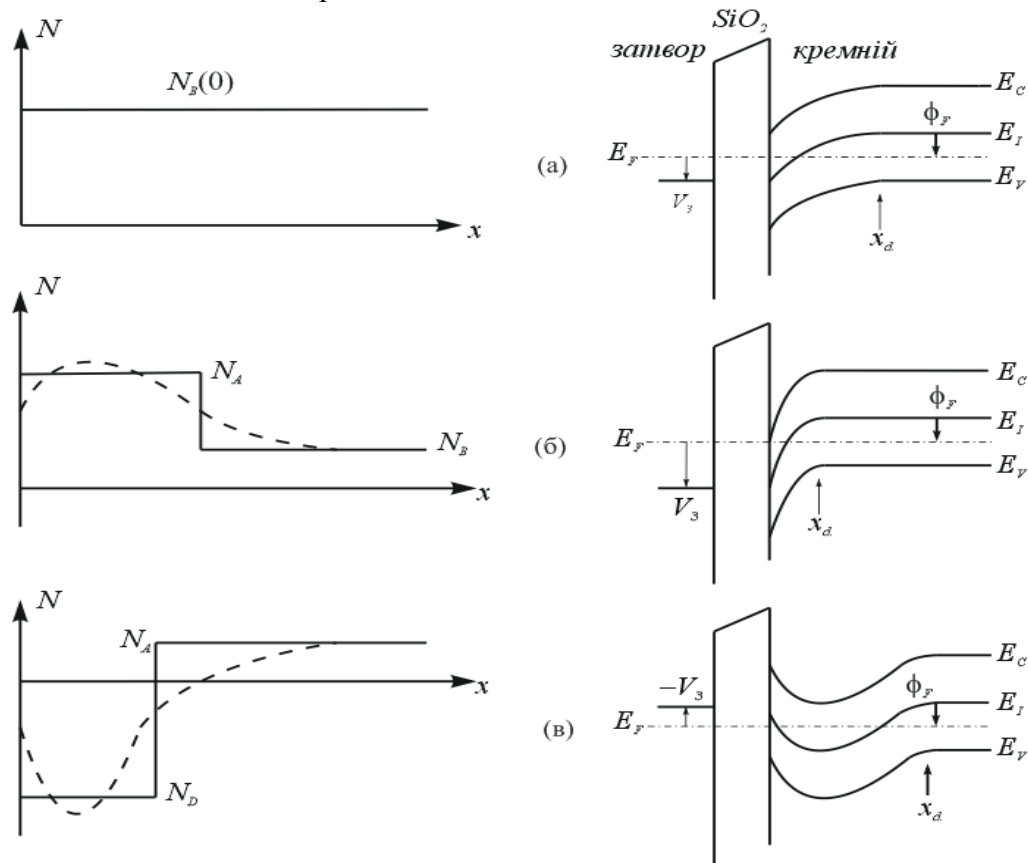


Рис. 4.

На рис. 5 зображена енергетична діаграма МДН-структури з однорідним легуванням підкладки з наступними позначеннями: ϕ_M – робота виходу електрона матеріалу затвора; χ – електронна спорідненість по відношенню до кремнію; V_0 – падіння напруги на підзатворному оксиді; ϕ_s – вигин зон на поверхні напівпровідника.

Для наступного розрахунку порогової напруги необхідно використати наступні співвідношення: $\phi_{MS} = \phi_M - \chi$ – різниця робіт виходу металу затвора і напівпровідникової підкладки; $Q_{SS} = qN_{SS}$, де Q_{SS} – щільність заряду межі розділу діелектрик-напівпровідник; N_{SS} – поверхнева концентрація заряду на межі розділу; $C_{ox} = \epsilon_0 \epsilon_{ox} / d_{ox}$, де C_{ox} – питома ємність підзатворного оксиду; ϵ_{ox} – відносна діелектрична проникність оксиду; ϵ_0 – діелектрична проникність вакууму; d_{ox} – товщина оксиду під затвором.

$$Q_B = \sqrt{2\epsilon_0 \epsilon_S q N_B} \cdot \sqrt{2\phi_B + U_n},$$

де Q_B – заряд у області збіднення під каналом; $\epsilon_s=11,8$ – відносна діелектрична проникність кремнію; N_B – концентрація домішок у підкладці; U_n – напруга між витокон і підкладкою.

$$\phi_F = \frac{k_B T}{q} \cdot \ln \left(\frac{N_B}{n_i} \right),$$

де ϕ_F – рівень Фермі у об'ємі кремнію; n_i – концентрація власних носіїв у кремнії.

$$\phi_M + V_0 = \chi + \frac{1}{2} E_g + \phi_F - \phi_S,$$

де $\frac{1}{2} E_g$ – половина ширини забороненої зони напівпровідника (рис. 5).

$$\phi_{MS} = \phi_M - \left(\chi + \frac{1}{2} E_g + \phi_F \right),$$

$$U_{00} = V_0 + \frac{Q_{SS}}{C_{ox}} - \phi_{MS} - \phi_S + \frac{Q_{SS}}{C_{ox}}.$$

Умова нейтральності для $\phi_S \leq 2\phi_F$

$$Q_{SS} + Q_B + Q_G = 0,$$

де Q_G – заряд на затворі.

$$Q_G = C_{ox} (U_G - \phi_{MS} - \phi_S),$$

де U_G – напруга на затворі. $U_G = U_{nop}$ при $\phi_S = 2\phi_F$.

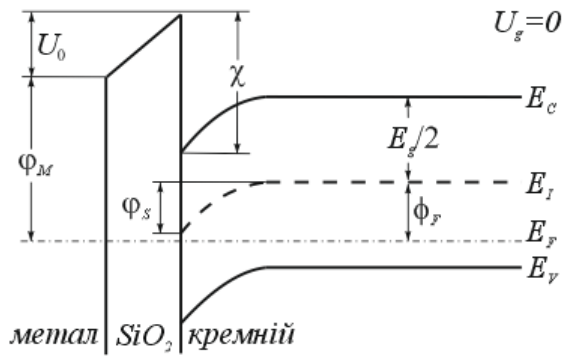


Рис. 5.

Порогова напруга МДН-транзистора з однорідним легуванням каналу визначається виразом

$$U_{nop}^0 = \phi_{MS} - \frac{qN_{SS}}{C_{ox}} \mp 2\phi_F \pm \frac{\sqrt{2q\epsilon_0\epsilon_s N_B}}{C_{ox}} \cdot \sqrt{|2\phi_F + U_n|} \quad (2)$$

При підлегванні поверхневої області кремнію домішкою того ж типу, що і домішка у підкладці, поріг транзистора зміщується у сторону більш високих значень на величину

$$\Delta U_{nop} = \mp D_s / C_{ox} \quad (3)$$

де D_s – доза легуючої домішки на 1 см^2 , $\text{Кл} / \text{см}^2$.

У формулі знак “–” відноситься до p -канальних приладів, а знак “+” – до n -канальних. Вираз

$$V_{FB} = \phi_{MS} - qN_{SS} / C_{ox} \quad (4)$$

називається напругою плоских зон і визначає якість межі розділу $\text{Si}-\text{SiO}_2$ і підзатворного оксиду.

Різниця робіт виходу між затвором і підкладкою залежить від ступеня легування підкладки при металевому затворі (табл. 1) і від ступеня легування затвору – для полікремнієвого затвору.

У цьому випадку різниця робіт виходу визначається виразом

$$\phi_{MS} = \pm \frac{k_B T}{q} \left(\ln \frac{N_G}{n_i} \right) \mp \ln \left(\frac{N_B}{n_i} \right). \quad (5)$$

Тут N_G – концентрація легуючої домішки у затворі, причому знак “+” відноситься до випадку, коли затвір легований домішкою іншого типу, ніж підкладка. Знак “+” перед дужкою відноситься до n -канальних приладів.

Таблиця 1

№ п/п	$N, \text{см}^{-3}$	$\phi_{MS}, \text{В}$
1	10^{14}	-0,36
2	10^{15}	-0,30
3	10^{16}	-0,24
4	10^{17}	-0,18

Приклади розрахунку

1. Розрахувати порогову напругу МДН-транзистора з індукованим каналом для випадку p -каналу з Al -затвором.

Вихідні дані: $N_{SS} = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$; $d_{ox} = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ см}$; $N_B = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$; $U_n = 2 \text{ В}$.

Попередньо розрахуємо питому ємність підзатворного оксиду, прийнявши відносну діелектричну проникність оксиду $\epsilon_{ox} = 3,6$.

$$C_{ox} = \epsilon_0 \epsilon_{ox} / d_{ox} = \frac{8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 3,6}{1,4 \cdot 10^{-5}} = 2,2757 \cdot 10^{-8} \text{ Ф / см}^2.$$

Розрахуємо рівень Фермі у об’ємі кремнієвої підкладки, враховуючи, що при $T = 293 \text{ К} (+20^\circ \text{C})$ власна концентрація носіїв у кремнії $n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

$$\phi_F = \frac{k_B T}{q} \cdot \ln \frac{N_B}{n_i} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{1,602 \cdot 10^{-19}} \cdot \ln \frac{5,0 \cdot 10^{15}}{1,5 \cdot 10^{10}} = 0,321 \text{ В}.$$

Із табл. 1 вибираємо значення ϕ_{MS} , що відповідає концентрації $N_B = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, що складає приблизно $\phi_{MS} = -0,26 \text{ В}$. Тоді порогова напруга при зміщенні на підкладці по відношенню до витоку

$$U_{por}^0 = -0,26 - \frac{1,62 \cdot 10^{-19} \cdot 2,10^{11}}{2,2757 \cdot 10^{-8}} - 2 \cdot 0,321 - \frac{\sqrt{2,1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1,185 \cdot 10^{15}} \cdot \sqrt{2 \cdot 0,321 + 2}}{2,2757 \cdot 10^{-8}} = -5,2313 \text{ В}.$$

2. Розрахувати порогову напругу МДН-транзистора з індукованим каналом для випадку p -каналу з полікремнієвим затвором.

Вихідні дані: $N_{SS} = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$; $d_{ox} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ см}$; $N_B = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$; $N_G = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$; $U_n = 0 \text{ В}$.

Попередньо розрахуємо питому ємність підзатворного оксиду для $\epsilon_{ox} = 3,6$:

$$C_{ox} = \epsilon_0 \epsilon_{ox} / d_{ox} = \frac{8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 3,6}{1,2 \cdot 10^{-5}} = 2,655 \cdot 10^{-8} \text{ Ф / см}^2.$$

Розраховуємо рівень Фермі у об’ємі кремнієвої підкладки, враховуючи, що власна концентрація носіїв у кремнії при $T = 300 \text{ К}$ $n_i \approx 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

$$\phi_F = \frac{k_B T}{q} \cdot \ln \frac{N_B}{n_i} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,602 \cdot 10^{-19}} \cdot \ln \frac{5,0 \cdot 10^{15}}{1,5 \cdot 10^{10}} = 0,321 \text{ В}.$$

Різниця робіт виходу ϕ_{MS} при умові, що затвір легований тим же типом домішки, що і підкладка, складає

$$\phi_{MS} = -\frac{k_B T}{q} \left(\ln \frac{N_G}{n_i} - \ln \frac{N_B}{n_i} \right) = -\frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,602 \cdot 10^{-19}} \cdot \left(\ln \frac{5,0 \cdot 10^{17}}{1,5 \cdot 10^{10}} - \ln \frac{5,0 \cdot 10^{15}}{1,5 \cdot 10^{10}} \right) = -0,132 \text{ В}.$$

Тоді порогова напруга

$$U_{nop}^0 = \phi_{MS} - \frac{qN_{SS}}{C_{ox}} - 2\phi_F \cdot \frac{\sqrt{2q\epsilon_0\epsilon_S N_B}}{C_{ox}} \cdot \sqrt{|2\phi_F|}$$

визначиться так

$$U_{nop}^0 = -0,132 - \frac{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 1,5 \cdot 10^{11}}{2,655 \cdot 10^{-8}} - 2 \cdot 0,3154 - \frac{\sqrt{2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 11,8 \cdot 10^{15}} \cdot \sqrt{2 \cdot 0,3154}}{2,655 \cdot 10^{-8}} = -2,569 \text{ В}.$$

3. Розрахувати порогову напругу МДН-транзистора з індукованим каналом для випадку n -каналу з полікремнієвим затвором.

Вихідні дані: $N_{SS} = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$; $d_{ox} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ см}$; $N_B = 8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$; $N_G = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; $D_S = 0,04 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/см}^2$; $U_n = 0 \text{ В}$; $T = 300 \text{ К}$.

Розраховуємо питому ємність підзатворного оксиду:

$$C_{ox} = \epsilon_0 \epsilon_{ox} / d_{ox} = \frac{8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 3,6}{8 \cdot 10^{-6}} = 3,9825 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2.$$

Рівень Фермі при власній концентрації носіїв $n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ при $T = 300 \text{ К}$:

$$\phi_F = \frac{k_B T}{q} \cdot \ln \frac{N_B}{n_i} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,602 \cdot 10^{-19}} \cdot \ln \frac{8,0 \cdot 10^{14}}{1,5 \cdot 10^{10}} = 0,28128 \text{ В}.$$

Різниця робіт виходу при умові, що затвір і підкладка леговані домішками різного типу, складає

$$\phi_{MS} = \frac{k_B T}{q} \left(\ln \frac{N_G}{n_i} + \ln \frac{N_B}{n_i} \right) = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,602 \cdot 10^{-19}} \cdot \left(\ln \frac{5,0 \cdot 10^{18}}{1,5 \cdot 10^{10}} + \ln \frac{8,0 \cdot 10^{14}}{1,5 \cdot 10^{10}} \right) = 0,7884 \text{ В}.$$

Зсув порога за рахунок підлегвання підкладки у області каналу

$$\frac{D}{C_{ox}} = \frac{0,04 \cdot 10^{-6}}{3,9825 \cdot 10^{-8}} = 1,0044 \text{ В}.$$

Тоді порогова напруга

$$U_{nop}^0 = 0,78843 - \frac{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 2,10^{11}}{3,9825 \cdot 10^{-8}} + 1,0044 + 2 \cdot 0,28128 + \frac{\sqrt{2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 11,8 \cdot 10^{14}} \cdot \sqrt{2 \cdot 0,28128}}{3,9825 \cdot 10^{-8}} = 1,8986 \text{ В}.$$

2.2. Розрахунок порогової напруги МДН-транзистора з вбудованим каналом

Порогова напруга МДН-транзистора з вбудованим каналом – це напруга на затворі, за якої провідний вбудований канал перекривається об'ємним зарядом. При створенні МДН-транзисторів із вбудованим каналом проводиться легування області каналу типом домішки, що співпадає з типом домішки в pn -переходах стоку та витоку. Легування проводиться, як правило, через плівку діелектрика, щоби пік розподілу легованої домішки розташовувався близько до межі розділу $Si - SiO_2$. Так як у такому випадку концентрація легованої домішки значно перевищує концентрацію домішки у підкладці, до певної глибини вона компенсує домішку підкладки.

На рис. 6, а показано ступінчасту апроксимацію профілю концентрації внесеної домішки, на рис. 6, б – відповідний розподіл заряду домішки у підкладці, звідки видно, що на глибині x_i відбувається зміна знаку домішки у підкладці. При прикладанні зовнішнього поля напруженість E у розглянутій області напівпровідника має вигляд, показаний на рис. 6, в, а відповідна зміна електричного потенціалу – на рис. 6, г. На глибині x_0 поле рівне нулю, а потенціал $\phi_x = \phi_{max}$.

Точка x_d відповідає межі області збіднення у підкладці. Звідси ширина області збіднення визначається виразом

$$x_d = \sqrt{\frac{N_D}{N_A} \cdot x_i^2 + \frac{2\epsilon_0\epsilon_S}{qN_A} (|-2\phi_F - U_n|)}, \quad (6)$$

а ширина поверхневої області збіднення x_p :

$$x_p = x_i - \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_s}{q} \left| (\phi_{\max} - \phi_F - U_n) \right| \frac{N_A}{N_D(N_D - N_A)}}. \quad (7)$$

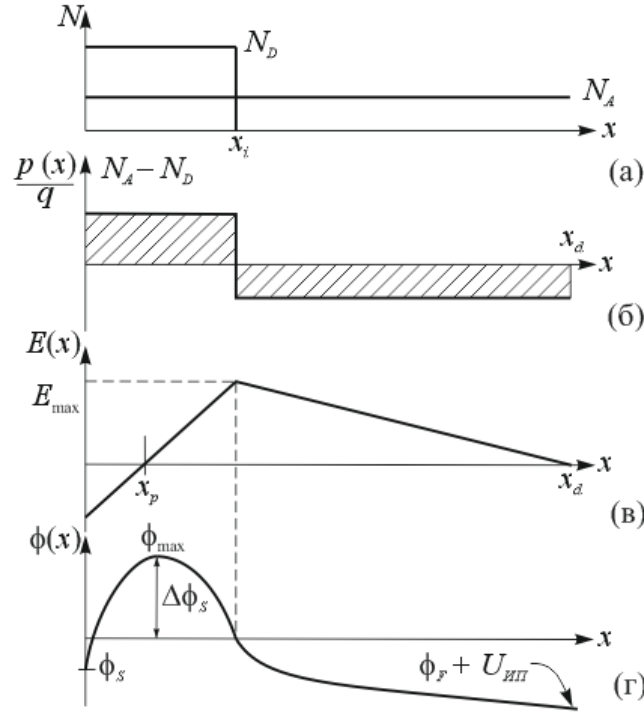


Рис. 6.

В даному випадку пороговій напрузі на затворі відповідає умова рівності максимального значення потенціалу у області каналу рівню Фермі для області легування, тобто $\phi_{\max} = -\phi_F$, випадку, коли кількість носіїв у каналі зменшується до значення, рівного їх кількості у підкладці. Порогова напруга визначається з виразу:

$$U_{\text{пор}} = U_{\text{пор}}^0 - \Delta U_{\text{пор}},$$

тобто

$$U_{\text{пор}} = U_{\text{пор}}^0 - \frac{D_s}{C_{ox}} + \frac{qN_A(x_d - x_d^0)}{C_{ox}} - \frac{q(N_D - N_A)}{2\varepsilon_0\varepsilon_s} x_i^2 - 2x_i \sqrt{\frac{q\phi_T}{2\varepsilon_0\varepsilon_s} \cdot \frac{N_A(N_D - N_A)}{N_D}} - \phi_T \cdot \frac{N_A}{N_D}. \quad (8)$$

Тут $\phi_F = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right)$ – рівень Фермі у області підкладки, а $x_d^0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_s}{qN_A} \cdot 2\phi_F}$ – ширина області збіднення для нелегованої підкладки; $\phi_T = (2\phi_F + U_n)$.

Перший член у скобках у виразі (8) показує зсув напруги на оксиді через легування, другий член залежить від I-го моменту дози і глибини легування, третій член показує зміну впливу об'ємного заряду, а четвертий – зміну виразу для рівня Фермі.

Концентрація домішок в іонно-легованій приповерхневій області кремнію визначається виразом

$$N_D = \frac{D_s}{qx_i}. \quad (9)$$

Приклад розрахунку

Вихідні дані: $N_A = 8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$; $D_s = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/см}^2$; $x_i = 3 \cdot 10^{-5} \text{ см}$; $d_{ox} = 0,8 \cdot 10^{-5} \text{ см}$; $T = 300 \text{ К}$; $N_D = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; $N_{ss} = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$.

Розрахуємо питому ємність підзатворного оксиду для діелектричної проникності SiO_2
 $\varepsilon_{ox} = 3,8$

$$C_{ox} = \varepsilon_0\varepsilon_{ox}/d_{ox} = \frac{8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 3,8}{8 \cdot 10^{-6}} = 4,20375 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2.$$

Рівень Фермі для $n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ при температурі $T = 300 \text{ K}$

$$\phi_F = \frac{k_B T}{q} \cdot \ln \frac{N_A}{n_i} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,602 \cdot 10^{-19}} \cdot \ln \frac{8,0 \cdot 10^{14}}{1,5 \cdot 10^{10}} = 0,28128 \text{ В}.$$

Різниця робіт виходу при умові, що затвір і підкладка леговані домішками різного типу

$$\Phi_{MS} = \frac{kT}{q} \left(\ln \left(\frac{N_D}{n_i} \right) + \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) \right) = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,602 \cdot 10^{-19}} \cdot \left(\ln \frac{2,0 \cdot 10^{18}}{1,5 \cdot 10^{10}} + \ln \frac{8,0 \cdot 10^{14}}{1,5 \cdot 10^{10}} \right) = 0,764 \text{ В}.$$

Ширина області збіднення для нелегованої підкладки

$$x_d^0 = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_s}{q N_A} \cdot 2\phi_F} = \sqrt{\frac{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 11,8 \cdot 2 \cdot 0,28128}{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 8 \cdot 10^{14}}} = 9,5749 \cdot 10^{-5} \text{ см}.$$

Концентрація домішок в іонно-легованій приповерхневій області

$$\frac{D_s}{q x_i} = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 3 \cdot 10^{-5}} = 4,1614 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}.$$

Ширина області збіднення для легованої підкладки

$$x_d = \sqrt{\frac{N_D}{N_A} x_i^2 + \frac{2\epsilon_0 \epsilon_s}{q N_A} \cdot 2\phi_F} = \sqrt{\frac{4,1614 \cdot 10^{16} \cdot (3 \cdot 10^{-5})^2}{8 \cdot 10^{14}} + \frac{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 11,8 \cdot 2 \cdot 0,28128}{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 8 \cdot 10^{14}}} = 2,3661 \cdot 10^{-4} \text{ см}.$$

Тоді порогова напруга

$$U_{\text{пор}} = U_{\text{пор}}^0 - \frac{D_s}{C_{\text{ox}}} + \frac{q N_A (x_d - x_d^0)}{C_{\text{ox}}} - \frac{q (N_D - N_A)}{2\epsilon_0 \epsilon_s} x_i^2 + 2x_i \sqrt{\frac{q (2\phi_F)}{2\epsilon_0 \epsilon_s} \cdot \frac{N_A (N_D - N_A)}{N_D}} - 2\phi_F \cdot \frac{N_A}{N_D}.$$

Тут $U_{\text{пор}}^0$ визначається з відомого співвідношення для МДН-транзистора з нелегованим каналом

$$U_{\text{пор}}^0 = \phi_{MS} + 2\phi_F - \frac{N_{ss} q}{C_{\text{ox}}} + \frac{\sqrt{2q\epsilon_0 \epsilon_s N_A}}{C_{\text{ox}}} \cdot \sqrt{2\phi_F}$$

і буде мати таке значення

$$U_{\text{пор}}^0 = 0,764 + 2 \cdot 0,28128 - \frac{2 \cdot 10^{11} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}}{4,20375 \cdot 10^{-8}} - \sqrt{\frac{2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 11,8 \cdot 8 \cdot 10^{14} \cdot 2 \cdot 0,28128}{(4,20375 \cdot 10^{-8})^2}} = 0,857045 \text{ В}.$$

Порогова напруга транзистора з вбудованим каналом

$$U_{\text{пор}} = 0,857045 - \frac{2,0 \cdot 10^{-7}}{4,20375 \cdot 10^{-8}} + \frac{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 8 \cdot 10^{14} (2,3661 \cdot 10^{-4} - 0,95749 \cdot 10^{-4})}{4,20375 \cdot 10^{-8}} - \frac{1,602 \cdot 10^{-19} (4,1614 \cdot 10^{16} - 8 \cdot 10^{14}) (3 \cdot 10^{-5})^2}{28,85 \cdot 10^{-14} \cdot 11,8} +$$

$$+ \sqrt{\frac{(2 \cdot 3 \cdot 10^{-5})^2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 0,28128 \cdot 8 \cdot 10^{14} (4,1614 \cdot 10^{16} - 8 \cdot 10^{14})}{28,85 \cdot 10^{-14} \cdot 11,8 \cdot 4,1614 \cdot 10^{16}}} - \frac{2 \cdot 0,28128 \cdot 8 \cdot 10^{14}}{4,1614 \cdot 10^{16}} = -5,950338 \text{ В}.$$

2.3. Розрахунок ємностей МДН-транзистора і елементів конструкції

При конструюванні інтегральних схем на МДН-транзисторах виникає необхідність розрахунку усіх ємностей транзисторів, міжз'єднань, конденсаторів та діодів. Для подальшого розрахунку перехідних процесів необхідно знати внутрішні ємності інтегральної схеми. До розглянутих ємностей відносяться міжелектродні ємності МДН-транзистора; ємності дифузійних шин; ємності металевих та полікремнієвих шин; ємності МДН-транзисторів.

1. Розрахунок міжелектродних ємностей МДН-транзистора

На рис. 7, а, б показана топологія МДН-транзистора, а на рис. 7, в, г – структура цього транзистора, виконаного за технологією p -канальних МДН ІС з Al –затвором і n -канальних МДН ІС з полікремнієвим затвором відповідно. На рис. 7, д зображена спрощена еквівалентна схема МДН-транзистора на змінному струмі, де $C_{зи}$ – ємність перекриття між затвором та витоком; $C_{зс}$ – ємність перекриття між затвором та стоком; $C_{зк}$ – ємність між затвором і каналом транзистора; $C_{кн}$ – ємність між каналом і підкладкою МДН-транзистора;

13

Тут $C_{01} = \varepsilon_0 \varepsilon_{01} / d_1$ – питома ємність підзатворного оксиду; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-14} \text{ Ф/см}$ – діелектрична стала вакууму; $\varepsilon_{01} = 3,6 \dots 4,0$ – відносна діелектрична проникність підзатворного першого оксиду; d_1 – товщина підзатворного оксиду, см; $C_{02} = \varepsilon_0 \varepsilon_{02} / d_2$ – питома ємність оксиду над p^+ -областю, отриманої після розгонки, Ф/см; $\varepsilon_{02} = 4,0$ – відносна діелектрична проникність другого оксиду над p^+ -областю; d_2 – товщина оксиду над p^+ -областю; W_k – ширина каналу МДН-транзистора, рівна ширині дифузійної області витоку (стоку), якщо $A \geq 0$, або рівна ширині області тонкого оксиду (пунктирна лінія на рис. 8, а), якщо $A < 0$; x_j – глибина pn -переходу витоку та стоку; K_δ – коефіцієнт бокової дифузії.

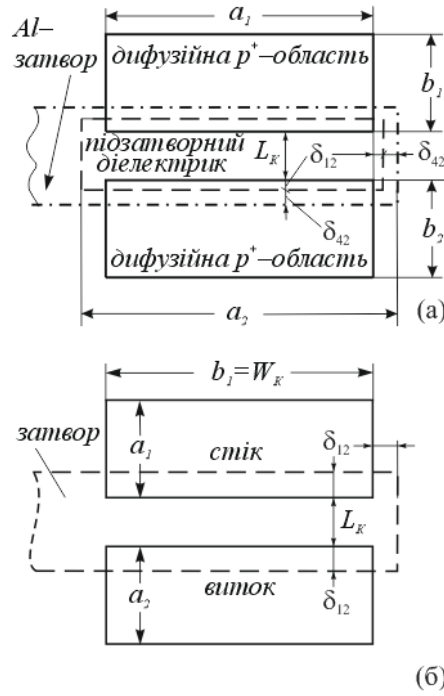


Рис. 8.

Для p -канальних МДН-транзисторів $K_\delta = 0,67$, а для n -канальних – $K_\delta = 0,8$.

$$A_1 = \sqrt{\frac{1}{2} q \varepsilon_0 \varepsilon_s N_B}, \quad \varepsilon_s = 11,8 \quad (15)$$

L_k – довжина каналу МДН-транзистора на фотошаблоні; $U_{ин}$ – напруга між витком і підкладкою; U_{cn} – напруга між стоком і підкладкою; потенціал Фермі

$$\phi_F = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{N_B}{n_i} \right); \quad (16)$$

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – стала Больцмана; T – температура навколишнього середовища, К; q – заряд електрону, рівний $-1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$;

$$A_2 = \sqrt[n]{q \varepsilon_0 \varepsilon_s \frac{N_s N_B}{2(N_s + N_B)}}; \quad (17)$$

контактна різниця потенціалів pn -переходу витоку (стоку)

$$\phi_k = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{N_s N_B}{n_i^2} \right), \quad (18)$$

де N_s – концентрація домішки у витіковому (стоковому) pn -переході, см^{-3} ; N_B – концентрація домішки у підкладці, см^{-3} ; n_i – концентрація вільних носіїв у власному

напівпровіднику, см^{-3} . Для кремнію при температурі 300 K $n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$; W_k – ширина області витікового (стокового) pn -переходу, см^{-3} .

У загальному вигляді необхідна заміна величини $W_k \cdot b$ на S , де S – площа витікового (стокового) pn -переходу, см . Для транзистора, зображеного на рис. 7, б, ємності $C_{зк}$, $C_{кп}$, $C_{сн}$, $C_{ун}$ розраховуються за формулами (11), (12), (14), (14а), а ємності $C_{зу}$, $C_{зс}$ за формулою

$$C_{зу} = C_{зс} = C_{01} W_k \cdot x_j K_\delta \quad (19)$$

δ_{12} і δ_{42} – перекриття 1-го і 2-го, 4-го і 2-го шарів відповідно, см .

Приклади розрахунку

1. На рис. 8, а зображена топологія МДН-транзистора з алюмінієвим затвором. Розрахуємо його міжелектродні ємності.

Вихідними даними для розрахунку являються геометричні розміри: $L_k = 10\text{ мкм}$ – довжина каналу МДН-транзистора на фотошаблоні – відстань між p^+ -дифузійними областями стоку та витоку; $a_1 = 100\text{ мкм}$ – ширина p^+ -областей стоку та витоку, рівна ширині каналу МДН-транзистора; $a_2 = 110\text{ мкм}$ – ширина області підзатворного оксиду по ширині каналу; $b_1 = 40\text{ мкм}$; $b_2 = 50\text{ мкм}$ – ширина дифузійних областей стоку та витоку відповідно; $\delta_{12} = 5\text{ мкм}$ – перекриття областю тонкого підзатворного оксиду p^+ -області стоку або витоку по довжині каналу; $\delta_{42} = 10\text{ мкм}$ – перекриття областю Al -затвору областей тонкого оксиду по довжині і ширині каналу; $x_j = 3,2\text{ мкм}$ – глибина pn -переходів стоку або витоку і підкладки; $d_1 = 0,12\text{ мкм}$, $d_2 = 1,2\text{ мкм}$ – товщини підзатворного оксиду та оксиду над p^+ -областю відповідно; $N_s = 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ – концентрація домішок в p^+ -області стоку або витоку; $N_B = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ – концентрація домішок у підкладці; $U_z > U_{пор}$; $U_{ун} = 0$; $U_{сн} = -5\text{ В}$ – напруга на затворі, витоці та стоці відповідно.

Визначимо ємності між затвором та стоком (або витоком):

$$C_{зу} = C_{зс} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{01} W_k (\delta_{12} + x_j K_\delta)}{d_1} + \frac{\epsilon_0 \epsilon_{02} W_k \delta_{42}}{d_2},$$

тобто чисельно так

$$C_{зу} = C_{зс} = \frac{3,68,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1 \cdot 10^{-2} (5 \cdot 10^{-4} + 3,2 \cdot 10^{-4} \cdot 0,67)}{1,2 \cdot 10^{-5}} + \frac{4,08,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{1,2 \cdot 10^{-4}} = 0,2192 \text{ нФ}.$$

Так як $U_z > U_{пор}$, ємність затвір-канал визначається за формулою

$$C_{зк} = C_{01} W_k (L_k - 2x_j K_\delta) = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{01} W_k (L_k - 2x_j K_\delta)}{d_1},$$

тобто чисельно так

$$C_{зк} = \frac{3,68,85 \cdot 10^{-14} \cdot 2 \cdot 10^{-2} (1 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 3,2 \cdot 10^{-4} \cdot 0,67)}{1,2 \cdot 10^{-5}} = 0,3033 \text{ нФ}.$$

Ємність канал-підкладка визначається за формулою

$$C_{кп} = \frac{A_1 \left[(L_k - 2x_j K_\delta) W_k + (a_2 + a_1) (L_k + 2\delta_{12}) \right]}{\sqrt{2\phi_F + \frac{1}{2} \cdot |U_{сн} + U_{ун}|}},$$

де $A_1 = \sqrt{\frac{1}{2} q \epsilon_0 \epsilon_s N_B} = \sqrt{\frac{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 11,88,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1 \cdot 10^{15}}{2}} = 9,14595 \cdot 10^{-9} \text{ Ф} \cdot \text{В}^{-1/2} \cdot \text{см}^{-2}$; $(a_2 - a_1) \cdot (L_k + 2\delta_{12})$ – периферійна частина області каналу, що знаходиться поза основною шириною каналу W_k під підзатворним оксидом. Відповідно,

$$C_{кп} = \frac{9,14595 \cdot 10^{-9} \left[(1 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 3,2 \cdot 10^{-4} \cdot 0,67) \cdot 1 \cdot 10^{-2} + (1,1 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-2}) (1 \cdot 10^{-3} + 2,5 \cdot 10^{-4}) \right]}{\sqrt{\frac{21,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,602 \cdot 10^{-19}} \ln \left(\frac{1,0 \cdot 10^5}{1,5 \cdot 10^{10}} \right) + 2,5}} = 4,02288 \cdot 10^{-14} \text{ Ф}.$$

Ємність витік-підкладки визначається за формулою

$$C_{un} = \frac{A_2 \cdot W_k \cdot b_2}{2,4 \sqrt[4]{\varphi_k + |U_{un}|}},$$

де

$$A = \sqrt{q \varepsilon_0 \varepsilon_s N_s N_B / 2(N_s + N_B)} = \sqrt{\frac{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 11,8 \cdot 10^{19} \cdot 1 \cdot 10^{15}}{2(1 \cdot 10^{19} + 1 \cdot 10^{15})}} = 9,14549 \cdot 10^{-9};$$

$$\varphi_k = \frac{k_B T}{q} \ln \frac{N_s N_B}{n_i^2} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,602 \cdot 10^{-19}} \ln \frac{1 \cdot 10^{19} \cdot 1 \cdot 10^{15}}{(1,5 \cdot 10^{10})^2} = 0,812113 \text{ В};$$

$$C_{un} = \frac{0,914549 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot 5 \cdot 10^{-2}}{2,4 \sqrt[4]{0,812113}} = 4,98697 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}.$$

Ємність стік-підкладки визначається за формулою

$$C_{cn} = \frac{A_2 \cdot W_k \cdot b_1}{2,4 \sqrt[4]{\varphi_k + |U_{cn}|}} = \frac{9,14549 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot 4 \cdot 10^{-2}}{2,4 \sqrt[4]{0,813113 + 5,0}} = 1,75697 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}.$$

2. Розрахуємо міжелектродні ємності n-канального МДН-транзистора (рис. 8, б).

Вихідними даними для розрахунку являються: $L_K = 8 \text{ мкм}$; $a_1 = 20 \text{ мкм}$; $a_2 = 30 \text{ мкм}$; $W_k = b = 100 \text{ мкм}$; $x_j = 1 \text{ мкм}$; $d = 8 \cdot 10^{-6} \text{ см}$; $N_s = 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$; $N_B = 8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$; $U_s < U_{nop}$; $U_{un} = 0$; $U_{cn} = 3 \text{ В}$.

Визначимо ємності між затвором та стоком і затвором і витоком:

$$C_{zu} = C_{zc} = W_k x_j K_\delta C_{01}$$

де

$$C_{01} = \varepsilon_0 \varepsilon_{ox} / d_1 = 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 3,6 / (8 \cdot 10^{-6}) = 3,9825 \cdot 10^{-8} \text{ Ф / см}^2.$$

Відповідно,

$$C_{zu} = C_{zc} = 1 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot 0,8 \cdot 3,9825 \cdot 10^{-8} = 3,186 \cdot 10^{-14} \text{ Ф}.$$

Так як $U_s < U_{nop}$, обчислюється не ємність затвір-канал, а послідовно ввімкнені ємності затвір-канал і канал-підкладка, тобто

$$C_{zn} = \frac{C_{зк} \cdot C_{кп}}{C_{зк} + C_{кп}},$$

де

$$C_{зк} = C_{01} W_k (L_k - 2x_j K_\delta) = 3,9825 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot 10^{-2} (8 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot 0,8) = 2,5488 \cdot 10^{-13} \text{ Ф};$$

$$C_{кп} = \frac{\sqrt{2} A_1 (L_k - 2x_j K_\delta) W_k}{\sqrt{3 \Phi_F}}.$$

Визначимо потенціал Фермі (для $T = 300 \text{ К}$)

$$\phi_F = \frac{k_B T}{q} \cdot \ln \frac{N_B}{n_i} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,602 \cdot 10^{-19}} \cdot \ln \frac{8,0 \cdot 10^{14}}{1,5 \cdot 10^{10}} = 0,28128 \text{ В}.$$

і коефіцієнт

$$A_1 = \sqrt{\frac{1}{2} q \varepsilon_0 \varepsilon_s N_B} = \sqrt{\frac{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 11,8 \cdot 10^{14}}{2}} = 8,18039 \cdot 10^{-9} \text{ Ф} \cdot \text{В}^{-1/2} \cdot \text{см}^{-2}.$$

Тоді

$$C_{кп} = \frac{\sqrt{2} \cdot 8,18039 \cdot 10^{-9} (8 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot 0,8) \cdot 1 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{3 \cdot 0,28128}} = 8,06 \cdot 10^{-14} \text{ Ф};$$

$$C_{zn} = \frac{0,25488 \cdot 0,0806}{0,25488 + 0,0806} = 0,0612 \text{ нФ} = 6,12 \cdot 10^{-14} \text{ Ф}.$$

Ємність витік-підкладки визначається за формулою

$$C_{un} = \frac{A_2 W_k a_2}{2,4 \sqrt[4]{\varphi_k + |U_{un}|}},$$

де

$$A_2 = \sqrt{\frac{q\epsilon_0\epsilon_s N_s N_B}{2(N_s + N_B)}} = \sqrt{\frac{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1,8 \cdot 10^{19} \cdot 8 \cdot 10^{14}}{2(1 \cdot 10^{19} + 8 \cdot 10^{14})}} = 1,156835 \cdot 10^{-8} \Phi \cdot B^{-1/2} \cdot \text{см}^{-2}.$$

Контактна різниця потенціалів для $T = 300 \text{ K}$

$$\phi_k = \frac{k_B T}{q} \ln \frac{N_s N_B}{n_i^2} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,602 \cdot 10^{-19}} \cdot \ln \frac{1 \cdot 10^{19} \cdot 1 \cdot 10^{14}}{(1,5 \cdot 10^{10})^2} = 0,806347 \text{ В}.$$

При $U_{un} = 0$

$$C_{un} = \frac{1,156835 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{\sqrt[2,4]{0,806347}} = 3,79614 \cdot 10^{-13} \Phi.$$

Ємність стік-підкладка для $U_{cn} = 3 \text{ В}$ визначається за формулою

$$C_{un} = \frac{A_2 W_k a_1}{\sqrt[2,4]{\phi_k + U_{cn}}} = \frac{1,156835 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{\sqrt[2,4]{0,806347 + 3,0}} = 1,32563 \cdot 10^{-13} \Phi.$$

2. Розрахунок ємності дифузійних шин.

На рис. 9, а зображена типова конфігурація шини, а на рис. 9, б, в – її структура для технології p - і n -канальних МДН-транзисторів відповідно. Ємність дифузійної шини складається із бар'єрних ємностей плоскої та торцевої частин pn -переходів при напрузі U_{pn}

$$C_{ou\phi} = C_{\partial n} + C_{\partial m} \quad (20)$$

де

$$C_{\partial n} = \frac{A_1 S_1}{\sqrt[n_0]{\phi_{k1} + U_{pn}}}, \quad (21)$$

для p -каналу

$$C_{\partial m} = \frac{A_2 S_2}{\sqrt[n_2]{\phi_{k1} + U_{pn}}}; \quad (22)$$

для n -каналу

$$C_{\partial m} = \frac{A'_2 S_2}{\sqrt[n_1]{\phi_{k2} + U_{pn}}}; \quad (23)$$

і

$$A_1 = [\epsilon_0 \epsilon_s q N_s N_{B1} / 2(N_s + N_{B1})]^{1/n_0}, \quad n_0 = 2, 4;$$

$$A_2 = [\epsilon_0 \epsilon_s q N_s N_{B1} / 2(N_s + N_{B1})]^{1/n_2}, \quad n_2 = 2, 6;$$

$$A'_2 = [\epsilon_0 \epsilon_s q N_s N_{B1} / 2(N_s + N_{B1})]^{1/n_1}, \quad n_1 = 2, 2;$$

де N_s – концентрація домішки в дифузійній шині, см^{-3} ; N_{B1} – концентрація домішки у підкладці, см^{-3} ; N_{B2} – концентрація домішки у приповерхневій p^+ -області підкладки (для технології n -канальних МДН ІС).

Площа плоскої частини ємності дифузійної шини для шини довільної конфігурації

$$S_1 = S_0 - L_\Sigma \cdot (1 - K_\delta) x_j + 4 \cdot [(1 - K_\delta) x_j]^2 \quad (24)$$

де S_0 – геометрична (топологічна) площа дифузійної шини, см^2 ; $L_\Sigma = \sum_{i=1}^m (x_i + y_i)$ – сумарна довжина периметра дифузійної шини (для шини на рис. 9, а $m=7$), см ; x_j – глибина pn -переходу, см .

Площа торцевої частини pn -переходу, що апроксимується циліндричною поверхнею, для p -канальних МДН ІС (рис. 9, б)

$$S_2 = L_{\Sigma} \frac{\pi x_j}{2} - \frac{4\pi x_j^2}{2} \quad (25)$$

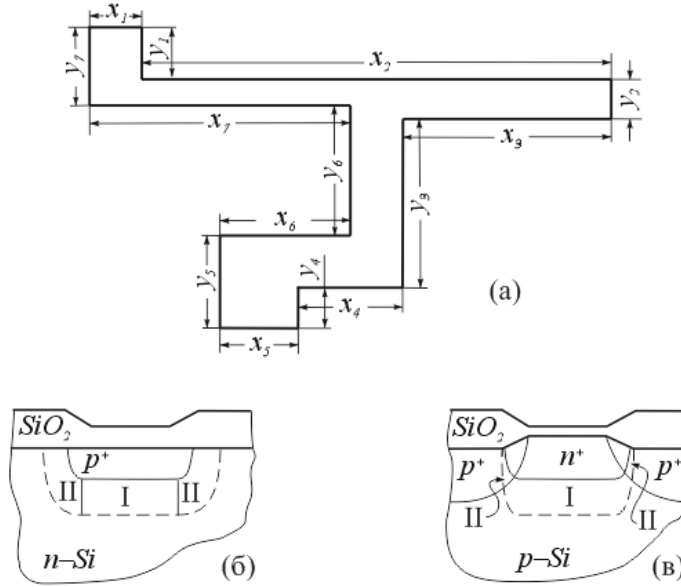


Рис. 9.

Для n -канальних МДН ІС (рис. 9, в) площа торцевої частини являється деякою частиною від S_2 і може бути апроксимована виразом

$$S'_2 = S_2 \cdot \kappa \quad (26)$$

де κ – коефіцієнт, що враховує зменшення торцевої частини за рахунок впливу клину локального оксиду. Звичайно приймається $\kappa = 0,7 \dots 0,8$.

Приклад. Розрахуємо ємність дифузійної шини в p -канальній МДН ІС, що має конструкцію, зображену на рис. 10. $N_B = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$; $N_S = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; $x_j = 2 \cdot 10^{-4} \text{ см}$; $U_{pn} = 5 \text{ В}$; $x_1 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ см}$; $y_1 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ см}$; $x_2 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ см}$; $y_2 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ см}$.

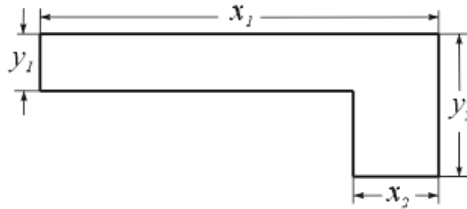


Рис. 10.

Визначимо площу плоскої частини pn -переходу за формулою (24):

$$S_1 = \frac{2,2}{10^2 \cdot 10^3} + \frac{1,5(5-2)}{10^3 \cdot 10^3} + \frac{(2,2 \cdot 10^{-2} + 2,5 \cdot 10^{-3})(1-0,67) \cdot 2}{10^4} + \frac{[4(1-0,67) \cdot 2]^2}{10^4} = 4,1269 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2.$$

Площа торцевої частини pn -переходу:

$$S_2 = L_{\Sigma} \cdot \frac{\pi x_j}{2} - \frac{4\pi x_j^2}{2} = \frac{5,0 \cdot 10^{-2} \cdot \pi \cdot 2}{2 \cdot 10^4} - \frac{4\pi (2 \cdot 10^{-4})^2}{2} = 1,5959 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2.$$

Контактна різниця потенціалів

$$\varphi_k = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_B N_S}{n_i^2} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,602 \cdot 10^{-19}} \ln \frac{1 \cdot 10^{15} \cdot 5 \cdot 10^{18}}{(1,5 \cdot 10^{10})^2} = 0,7942 \text{ В}.$$

Розрахуємо коефіцієнти A_1 і A_2

$$A_1 = [\epsilon_0 \epsilon_s q N_S N_B / 2(N_S + N_B)]^{1/2,4} = \left[\frac{8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 11,8 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{18} \cdot 1 \cdot 10^{15}}{2(5 \cdot 10^{18} + 1 \cdot 10^{15})} \right]^{1/2,4} = 1,9998 \cdot 10^{-7};$$

$$A_2 = [\epsilon_0 \epsilon_s q N_S N_B / 2(N_S + N_B)]^{1/2,6} = \left[\frac{8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 11,8 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{18} \cdot 1 \cdot 10^{15}}{2(5 \cdot 10^{18} + 1 \cdot 10^{15})} \right]^{1/2,6} = 6,5505 \cdot 10^{-7}.$$

Ємність плоскої частини pn -переходу:

$$C_{\partial n} = A_1 S_1 / \sqrt[2.4]{\varphi_{k_1} + U_{pn}} = \frac{1,9998 \cdot 10^{-7} \cdot 4,1269 \cdot 10^{-5}}{\sqrt[2.4]{0,7942 + 5,0}} = 3,694 \cdot 10^{-12} \Phi.$$

Ємність циліндричної частини pn -переходу:

$$C_{\partial m} = A_2 S_2 / \sqrt[2.6]{\varphi_{k_2} + U_{pn}} = \frac{6,5508 \cdot 10^{-7} \cdot 1,5959 \cdot 10^{-5}}{\sqrt[2.6]{0,7942 + 5,0}} = 5,319 \cdot 10^{-12} \Phi.$$

Ємність шини:

$$C_{\partial \text{шф}} = 3,969 \cdot 10^{-12} + 5,319 \cdot 10^{-12} = 9,288 \cdot 10^{-12} \Phi.$$

3. Розрахунок ємності металевих та полікремнієвих шин.

В інтегральних схемах, виконаних на p - або n -канальних МДН-транзисторах, ємності цих шин в першому наближенні представляють собою:

а) ємності плоских конденсаторів, однією із обкладок яких являється сама шина, а іншою – кремнієва підкладка (рис. 11, а, б);

б) ємності перетину металевих та дифузійних шин (рис. 11, в, г).

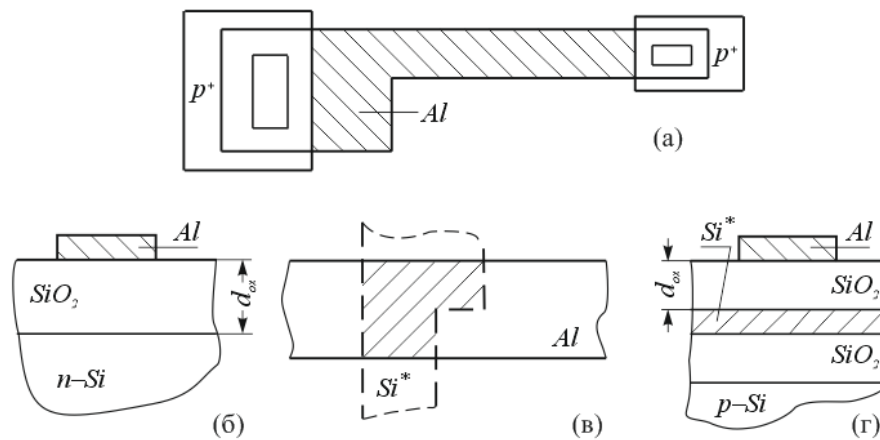


Рис. 11.

Ці ємності обчислюються за формулою

$$C_{\text{ш(перет)}} = S_{\text{ш(перет)}} \frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{ox}}}{d_{\text{ox}}}, \quad (27)$$

де $C_{\text{ш(перет)}}$ – ємність шини на підкладку (ємність перетину шин); $S_{\text{ш(перет)}}$ – площа шини (площа області перетину шин). На рис. 11, а показана топологія металеві шини (заштрихована частина підлягає розрахунку як ємність шини на підкладку). На рис. 11, б показана ємність шина-підкладка у розрізі (d_{ox} – товщина оксиду між шиною і n -підкладкою). На рис. 11, в показана топологія ділянки перетину металеві і полі кремнієвої (чи дифузійної) шин. Тут заштрихована область перетину підлягає розрахунку. На рис. 11, г показана у розрізі ємність шина-шина.

Приклад. Розрахуємо ємність полі кремнієвої шини в n -канальній МДН ІС, що має конструкцію, зображену на рис. 11. $d_{\text{ox}} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ см}$; $\epsilon_{\text{ox}} = 4,0$; $x_1 = 3 \cdot 10^{-2} \text{ см}$; $y_1 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ см}$; $x_2 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ см}$; $y_2 = 1 \cdot 10^{-2} \text{ см}$.

Площа шини

$$S_{\text{ш}} = 3 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 10^{-3} \cdot (1 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 10^{-3}) = 8,4 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2.$$

Ємність шини:

$$C_{\text{ш}} = \epsilon_0 \epsilon_{\text{ox}} S_{\text{ш}} / d_{\text{ox}} = \frac{8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 4,0 \cdot 8,4 \cdot 10^{-5}}{1,2 \cdot 10^{-4}} = 2,478 \cdot 10^{-13} \Phi.$$

3. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЛОГІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА МДН-ТРАНЗИСТОРАХ

Складовою частиною логічних схем на МДН-транзисторах є МДН-інвертори з різним типом навантаження (нелінійне (рис. 12, б), квазілінійне (рис. 12, а) та динамічне навантаження (рис. 13)). МДН-інвертори, в яких при вмиканні активного транзистора протікає струм, можна розраховувати двома способами. Перший спосіб, більш простий, використовується при заданому значенні струму через навантаження. Другий спосіб використовується при заданому значенні часу вмикання, вимикання та вихідної ємності. Слід відмітити, що для розрахунку МДН-інверторів, в яких обидва транзистори знаходяться в протилежних станах одночасно (закритий/відкритий), а тому постійний струм через нього не протікатиме, використовується лише другий спосіб.

Складна логічна схема умовно розбивається на основні каскади-інвертори (вхідний, проміжний та вихідний каскади) і послідовно розраховується кожен з них. Вхідний та проміжний каскади розраховуються на основі струму через навантаження (підрозділ 3.1), а вихідний каскад – за його динамічними характеристиками (підрозділ 3.2).

3.1. Розрахунок МДН-інверторів на основі струму через навантаження

У схемах на МДН-транзисторах застосовуються нелінійне і квазілінійне навантаження у вигляді МДН-транзисторів (рис. 12).

Рівняння струму через МДН-транзистор:

а) в крутій області характеристики (ненасичений режим роботи) при $|U_z - U_{пор}| \geq |U_c|$

$$i_c = \frac{\mu \epsilon_0 \epsilon_{ox}}{d_{ox}} \cdot \frac{W}{L} \cdot \left[(U_z - U_{пор}) U_c - \frac{U_c^2}{2} \right]; \quad (28)$$

б) в пологій області характеристики (насичений режим роботи) при $|U_z - U_{пор}| < |U_c|$

$$i_c = \frac{\mu \epsilon_0 \epsilon_{ox}}{2 d_{ox}} \cdot \frac{W}{L} \cdot (U_c - U_{пор})^2, \quad (29)$$

де

$$U_{пор} = U_{пор}^0 + K \sqrt{2\phi_F + U_u} - K \sqrt{2\phi_F}; \quad (30)$$

U_z – напруга на затворі МДН-транзистора; $U_{пор}$ – порогова напруга МДН-транзистора; U_c – напруга на стоці МДН-транзистора; μ – рухливість носіїв у каналі транзистора; приймається постійною для спрощення розрахунків, хоча залежить від напруги на затворі і на стоці; $\mu_p = 120 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ – для p -канальних МДН-транзисторів, $\mu_n = 600 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ – для n -канальних МДН-транзисторів; ϵ_0 – діелектрична проникність вакууму; ϵ_{ox} – відносна діелектрична стала; W – ширина каналу МДН-транзистора; d_{ox} – товщина підзатворного оксиду; L – довжина каналу МДН-транзистора; K – коефіцієнт впливу підкладки на порогову напругу.

Активний МДН-транзистор – це транзистор, на затвір якого подається вхідний сигнал, тобто $U_z = U_{вх}$, тоді напруга на стоці $U_c = U_{вих}$.

В якості нелінійного навантаження у схемі МДН-інвертора використовується МДН-транзистор, що працює в пологій області характеристик (рис. 12, б), а в якості квазілінійного навантаження – транзистор, що працює в крутій області характеристик (рис. 12, а). для навантажувального транзистора $U_z = U_{см}$ або U_n , а $U_c = U_n$.

Умова його роботи в пологій області

$$|U_{см} - U_{пор}| < |U_n|,$$

W_I і W_H – ширини каналу відповідно для активного та навантажувального транзистора; L_I і L_H – довжини каналів для тих же транзисторів.

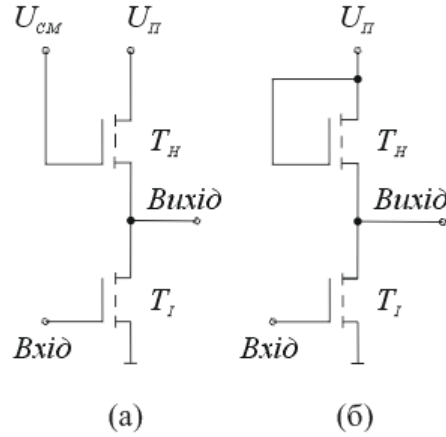


Рис. 12.

З ростом напруги на витоці навантажувального транзистора збільшується і порогова напруга:

$$U_{nor} = U_{nor}|_{U_u=0} + K\sqrt{2\phi_F + U_u} - K\sqrt{2\phi_F},$$

де $U_u = U_{vux}$, $U_{nor}|_{U_u=0} = U_{nor}^0$, $K = d_{ox}\sqrt{2\varepsilon_0\varepsilon_s q N_B}/(\varepsilon_0\varepsilon_{ox})$ – коефіцієнт впливу підкладки на порогову напругу.

Для навантажувального транзистора, що працює в пологій області характеристики, рівняння струму:

$$i_H = \frac{\mu\varepsilon_0\varepsilon_{ox}}{2d_{ox}} \cdot \frac{W_H}{L_H} \cdot (U_{cm} - U_{nor} - U_u)^2 = \frac{\mu\varepsilon_0\varepsilon_{ox}}{2d_{ox}} \cdot \frac{W_H}{L_H} \cdot (U_{cm} - U_{nor} - U_{vux})^2. \quad (31)$$

Тоді аналітичний вираз для передавальних характеристик інвертора з таким навантаженням, пронормовані по $U_{cm} - U_{nor}$:

а) для пологої області характеристик керуючого транзистора

$$\left[1 - \frac{U_{vux}}{U_{cm} - U_{nor}}\right]^2 = \frac{W_I L_H}{W_H L_I} \cdot \left[\frac{U_{vux} - U_{nor}^0}{U_{cm} - U_{nor}}\right]^2; \quad (32)$$

б) для крутої області характеристик керуючого транзистора

$$\left[1 - \frac{U_{vux}}{U_{cm} - U_{nor}}\right]^2 = \frac{W_I L_H}{W_H L_I} \left[2 \left(\frac{U_{vux} - U_{nor}^0}{U_{cm} - U_{nor}}\right) \left(\frac{U_{vux}}{U_{cm} - U_{nor}}\right) - \left(\frac{U_{vux}}{U_{cm} - U_{nor}}\right)^2\right]. \quad (33)$$

Частковим випадком включення нелінійного навантаження являється об'єднання виводів затвора і стоку, тобто $U_{cm} = U_n$, для квазілінійного навантаження повинно виконуватись співвідношення напруг

$$|U_{cm} - U_{nor}| \geq |U_n|$$

Вираз для струму через квазілінійне навантаження

$$i_H = \frac{\mu\varepsilon_0\varepsilon_{ox} W_H}{d_{ox} m L_H} \cdot U_n^2 \cdot \left(1 - \frac{U_{vux}}{U_n}\right) \cdot \left(1 - m \cdot \frac{U_{vux}}{U_n}\right) \quad (34)$$

де

$$m = \frac{U_n}{2(U_{cm} - U_{nor}) - U_n}. \quad (35)$$

Коефіцієнт m має сенс лише в крутій області характеристики. При $|U_{cm} - U_{nor}| = U_n$, $m = 1$. З ростом напруги зміщення m спадає і прямує до нуля при $U_{cm} \rightarrow \infty$.

Передавальні характеристики інверторів описуються аналітичними виразами:

а) для крутої області характеристики керуючого транзистора

$$\left(1 - \frac{U_{\text{вх}}}{U_n}\right) \cdot \left(1 - m \frac{U_{\text{вх}}}{U_n}\right) = m \cdot \frac{W_I L_H}{W_H L_I} \cdot \left[2 \cdot \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{пор}}^0}{U_n} \cdot \frac{U_{\text{вх}}}{U_n} - \left(\frac{U_{\text{вх}}}{U_n}\right)^2 \right] \quad (36)$$

б) для пологої області характеристики керуючого транзистора

$$\left(1 - \frac{U_{\text{вх}}}{U_n}\right) \cdot \left(1 - m \frac{U_{\text{вх}}}{U_n}\right) = m \cdot \frac{W_I L_H}{W_H L_I} \cdot \left(\frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{пор}}^0}{U_n}\right)^2 \quad (37)$$

На рис. 13 зображена електрична схема інвертора з транзистором із вбудованим каналом у якості навантаження. Тут витік транзистора з'єднаний з його затвором, що забезпечує кращу швидкодію схеми у порівнянні з попередніми випадками, одночасно при більш високій входній напрузі інвертора і його меншій потужності. На рис. 14, а, б показані робочі точки інверторів з нелінійним навантаженням на транзисторі з індукованим каналом і нелінійним навантаженням (що має характеристику джерела струму) на транзисторі з вбудованим каналом.

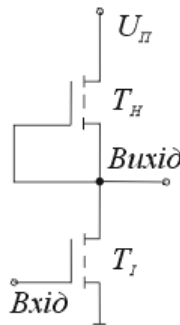


Рис. 13.

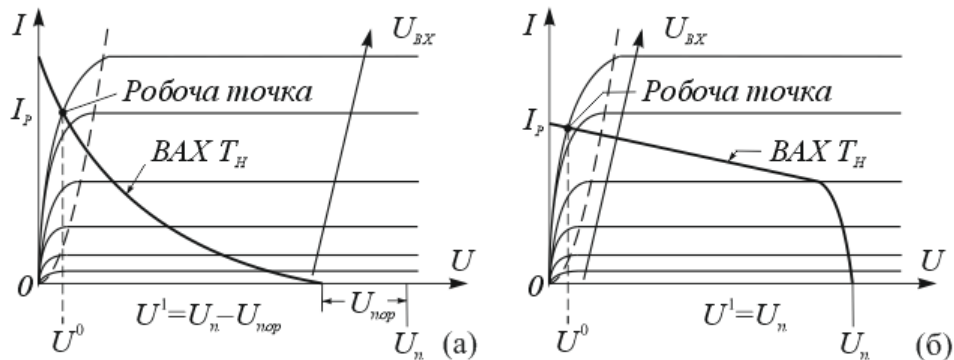


Рис. 14.

У другому випадку вища вихідна напруга, коли закритий вихідний транзистор, нижча вихідна низька напруга і робочий струм через інвертор. При включенні інвертора у другому випадку через навантажувальний транзистор протікає великий струм, швидше заряджаючи при цьому ємність навантаження інвертора.

Передавальна характеристика інвертора з транзистором збіднення в якості навантаження має вигляд

$$\frac{2W_I}{L_I} \cdot \left[(U_{\text{вх}} - U_{\text{пор}2}) \cdot U_{\text{вх}} - \frac{U_{\text{вх}}^2}{2} \right] = \frac{W_H}{L_H} \cdot [U_{\text{вх}} - U_{\text{пор}1}]^2 \quad (38)$$

де $U_{\text{пор}1}$ і $U_{\text{пор}2}$ – порогові напруги відповідно навантажувального і активного транзисторів.

Якщо розраховується не простий логічний інвертор, а схема спів падіння по “І” або по “АБО”, в якості активних транзисторів використовуються декілька паралельно або послідовно увімкнених активних транзисторів, як правило, однакових розмірів (їх розміри можуть відрізнятися, якщо відрізняються значення входних сигналів). При цьому, якщо транзистори увімкнені послідовно, при розрахунку вони замінюються одним, що має менші розміри (ширина каналу менше в число раз, рівне кількості послідовно увімкнених

транзисторів). Якщо ці транзистори ввімкнені паралельно, то у розрахунку передавальної характеристики або перехідного процесу приймає участь тільки один із них.

3.2. Розрахунок МДН-інверторів на основі динамічних характеристик

При розрахунку динамічних параметрів МДН-транзисторів визначають час ввімкнення або вимкнення інвертора при заданих розмірах транзисторів і ємності навантаження. Для простоти приймається, що в процесі ввімкнення інвертора приймає участь навантажувальний транзистор, активний транзистор миттєво закривається, а у процесі ввімкнення струм протікає через миттєво відкритий активний транзистор.

Час вимкнення для інвертора з нелінійним навантаженням у вигляді транзистора з індукованим каналом визначається виразом

$$t_{\text{выкл}} = \frac{2C_H d_{ox} L_H}{\mu \epsilon_0 \epsilon_{ox} W_H} \cdot \frac{U_{\max} - U_{\text{исх}}}{(U_{\text{вх}} - \bar{U}_{\text{пор}} - U_{\max}) \cdot (U_{\text{вх}} - \bar{U}_{\text{пор}} - U_{\text{исх}})} \quad (39)$$

де C_H – ємність навантаження інвертора (рис. 15); U_{\max} і $U_{\text{исх}}$ – відповідно максимальна напруга, до якої заряджається C_H , і вихідна напруга на виході,

$$U_{\max} = U_{\text{вх}} - U_{\text{пор}}^0 - K \sqrt{U_{\text{вх}} - U_{\text{пор}}^0}; \quad (40)$$

$$\bar{U}_{\text{пор}} = U_{\text{пор}}^0 + K \sqrt{2\phi_F + \frac{1}{2} \cdot (U_{\max} - U_{\text{исх}})} - K \sqrt{2\phi_F} \quad (41)$$

– усереднена порогова напруга транзистора у процесі зарядки ємності навантаження.

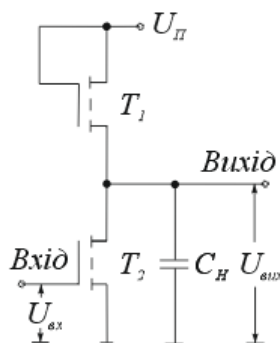


Рис. 15.

Час вимкнення для інвертора з квазілінійним навантаженням у вигляді транзистора з індукованим каналом визначається за формулою

$$t_{\text{выкл}} = \frac{m}{1-m} \cdot \frac{C_H d_{ox} L_H}{\mu \epsilon_0 \epsilon_{ox} (U_{\text{вх}} - \bar{U}_{\text{пор}}) W_H} \cdot \ln \left[\frac{1-m \cdot (U_{\text{вых}} / U_{\max})}{1 - (U_{\text{вых}} / U_{\max})} \right]. \quad (42)$$

Тут для простоти обчислення використовується усереднене значення порогової напруги $\bar{U}_{\text{пор}}$ та $U_{\text{вых}} / U_{\max} = U_{\text{вых}} / U_n$.

Час вимкнення інвертора, що має навантаження у вигляді транзистора зі збідненням, визначається з виразу

$$t_{\text{выкл}} = \frac{2L_H d_{ox} C_H}{W_H \epsilon_0 \epsilon_{ox} \mu (U_{\text{пор}_1} / U_n)^2 U_n}, \quad (43)$$

де $U_{\text{пор}_1}$ – порогова напруга транзистора з вбудованим каналом, для простоти не враховується вплив зміщення підкладки.

При ввімкненні інвертора з обговореними допущеннями, незалежно від виду навантаження, активний транзистор знаходиться спочатку в пологій області характеристик, поки не виконається умова (28), а потім – в крутій області характеристик.

У відповідності до цього процес ввімкнення складається із двох етапів. Час ввімкнення для першого із них визначається виразом

$$t'_{\text{ект}} = \frac{2C_H d_{\text{ox}} L_I}{\mu \epsilon_0 \epsilon_{\text{ox}} W_I} \cdot \frac{1}{2(U_{\text{ex}} - U_{\text{nop}}^0)} \cdot \frac{[U_{\text{max}} - (U_{\text{ex}} - U_{\text{nop}}^0)]}{U_{\text{ex}} - U_{\text{nop}}^0}. \quad (44)$$

Коли виконується умова $|U_{\text{вх}}| = |U_{\text{вх}}^0 - U_{\text{пор}}^0|$, час ввімкнення до моменту досягнення напруги

$$t''_{\kappa l} = \frac{C_H d_{ox} L_I}{\mu \epsilon_0 \epsilon_{ox} W_I} \cdot \frac{1}{2(U_{ex} - U_{nop}^0)} \cdot \ln \left[\frac{2(U_{ex} - U_{nop}^0) - U_{ocm}}{U_{ocm}} \right]. \quad (45)$$

Повний час ввімкнення визначається як сума $t_{\text{вкл}} = t'_{\text{вкл}} + t''_{\text{вкл}}$, або

$$t_{\text{ект}} = \frac{C_H d_{ox} L_I}{\mu \epsilon_0 \epsilon_{ox} W_I} \cdot \frac{1}{(U_{\text{ex}} - U_{\text{nop}}^0)} \cdot \left\{ \frac{U_{\text{max}} - (U_{\text{ex}} - U_{\text{nop}}^0)}{U_{\text{ex}} - U_{\text{nop}}^0} + \frac{1}{2} \ln \left[\frac{2(U_{\text{ex}} - U_{\text{nop}}^0) - U_{\text{ocm}}}{U_{\text{ocm}}} \right] \right\}. \quad (46)$$

Основна задача розрахунку МДН ІС за заданим зовнішнім впливом (напругою), технологічними параметрами і необхідними технічними характеристиками – визначення розмірів транзисторів і розрахунок потужності, що розсіюється схемою. Тому в усіх наведених виразах значення U_{ex} , U_{max} , $U_{\text{ост}}$, $U_{\text{исх}}$, $U_{\text{вых}}$, $t_{\text{выкл}}$, $t_{\text{вкл}}$ вважаються заданими і перетворюються до виду, зручному для обчислення ширини або довжини каналу.

Приклад 1

Розрахуємо схему 2-І-НЕ, зображену на рис. 16.

Вихідні дані: технологія p -канальних МДН ІМС з Al – затвором; $U_{nop}^0 = -4,5 \text{ В}$;
 $U_n = -15 \text{ В}$; $U_{cm} = -27 \text{ В}$; $U_{\theta K} = -10 \text{ В}$; $C_H = 0,5 \text{ нФ}$; $K = 1,2 \text{ В}^{1/2}$; $2\phi_F = 0,6 \text{ В}$;
 $\mu = 120 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$; $C_{ox} = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ Ф} / \text{см}^2$; $t_{\theta BK} = 0,5 \text{ мкс}$; $U_{\theta BK}^0 = -1 \text{ В}$.

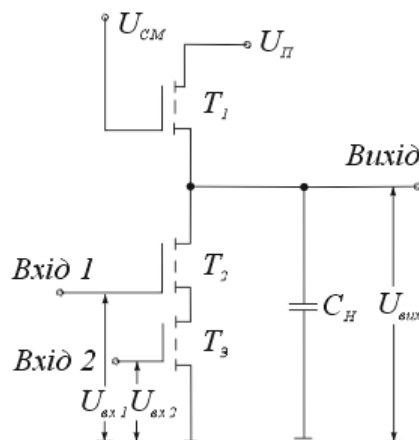


Рис. 16.

Для спрощення обираються абсолютні значення всіх порогових напруг. Розрахунок схеми починається із визначення розмірів навантажувального транзистора T_1 за часом вимкнення інвертора.

Попередньо необхідно встановити, у якому режимі роботи знаходиться транзистор T_1 , тобто перевірити співвідношення $|U_{\text{з}} - U_{\text{пор}}| \geq |U_c|$, яке для навантажувального транзистора має вигляд

$$|U_{CM} - U_{nop}| \geq |U_n|,$$

де

$$U_{nov} = U_{nov}^0 + K\sqrt{|2\phi_F + U_n|} - K\sqrt{2\phi_F} = 4,5 + 1,2 \cdot \sqrt{0,8 + 15} - 1,2 \cdot \sqrt{0,6} = 8,3 \text{ B}.$$

Таким чином,

$$|U_{cm} - U_{non}| = |27 - 8,3| = 18,7 \text{ B} > 15 \text{ B},$$

тобто транзистор T_1 знаходиться в крутій області вольт-амперних характеристик, і для часу вимкнення використовується формула (42), в якій

$$m = \frac{U_n}{2 \cdot (U_{cm} - U_{nop}) - U_n} = \frac{15}{2 \cdot (27 - 8,3) - 15} = 0,6696,$$

а напруга U_{ex} – відповідає напрузі U_{cm} .

Максимальна напруга на виході інвертора, до якої в процесі вимкнення може зарядитись ємність C_H , складає для транзистора T_1 , що працює у крутій області характеристик, $U_{max} = U_n$.

Час вимкнення інвертора розраховують до моменту часу, що відповідає $U_{вых} = 0,9 \cdot U_{max}$.

Усереднене значення порогової напруги

$$\bar{U}_{nop} = U_{nop}^0 + K \sqrt{2\phi_F + \frac{U_{max} - U_{исх}}{2}} - K \sqrt{2\phi_F},$$

де $U_{исх}$ – вихідна напруга на виході інвертора, від якого починається процес вимкнення:

$U_{исх} = U_{вых}^0$. Тоді

$$\bar{U}_{nop} = 4,5 + 1,2 \cdot \sqrt{0,6 + \frac{15+1,0}{2}} - 1,2 \cdot \sqrt{0,6} = 6,878 \text{ В}.$$

При визначенні розмірів каналу T_1 враховується, що розміри транзисторів мають бути мінімальними, а крутизна навантажувальних транзисторів значно менше крутизни активних транзисторів. Тому необхідно задаватись мінімально допустимою шириною каналу W_H транзистора T_1 і із $t_{выкл}$ розраховувати максимальне значення довжини каналу L_H .

Із конструктивно-технологічних обмежень для технології з Al – затвором мінімальна ширина області підзатворного оксиду складає 10 мкм , тобто $W_H = 10 \text{ мкм}$. Тоді

$$L_H = \frac{W_H m C_H (U_{ex} - U_{nop}) C_n \cdot \ln \left[\frac{1 - m \cdot (U_{вых} / U_{max})}{1 - (U_{вых} / U_{max})} \right]}{t_{выкл} (1 - m) \mu C_{ox}} =$$

$$= \frac{1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6696 \cdot 0,5 \cdot 10^{-12} \cdot (27 - 6,878) \cdot \ln \left[\frac{1 - 0,6696 \cdot 0,9}{1 - 0,9} \right]}{0,5 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - 0,6696) \cdot 120 \cdot 2,5 \cdot 10^{-8}} = 1,875 \cdot 10^{-2} \text{ см} = 181,5 \text{ мкм}.$$

Округляємо L_H до найближчого меншого значення: $L_H = 185 \text{ мкм}$.

Розміри активних транзисторів T_2 і T_3 визначають виходячи із вимоги забезпечення максимально допустимого значення $U_{вых}^0$ за формулами для передавальних характеристик МДН-інвертора. Припускається, що режим роботи послідовно ввімкнених транзисторів T_2 і T_3 однаковий, їх витoki підключені до виводу корпусу. Тоді ці транзистори замінюються одним еквівалентним транзистором T_E , у якого співвідношення W_E / L_E у два рази менше, ніж у кожного із T_2 і T_3 , тобто $W_E / L_E = \frac{1}{2} \cdot W_{1,2} / L_{1,2}$.

Для виведення виду передавальної характеристики заздалегідь визначаємо, в якій області вольт-амперних характеристик знаходяться транзистори T_2 , T_3 при подачі на їхній вхід напруги $U_{ex} > U_{nop}^0$. При $U_{ex} = U_3$ маємо, що $|U_3 - U_{nop}^0| \geq |U_c|$, де $U_c = U_{вых}^0$. Тоді $|10 - 4,5| = 5,5 > |-18| = 1 \text{ В}$.

Таким чином обирається рівняння передавальної характеристики для навантажувального і активного транзисторів, що працюють на крутій ділянці, тобто

$$\left(1 - \frac{U_{вых}}{U_n}\right) \cdot \left(1 - m \frac{U_{вых}}{U_n}\right) = m \cdot \frac{W_I L_H}{W_H L_I} \cdot \left[2 \cdot \frac{U_{ex} - U_{nop}^0}{U_n} \cdot \frac{U_{вых}}{U_n} - \left(\frac{U_{вых}}{U_n}\right)^2\right].$$

Коефіцієнт m необхідно визначити для нового значення порогової напруги транзистора T_1 при напрузі на його витоці $U_u = U_{\text{вых}}^0$, тобто

$$U_{\text{пор}} = U_{\text{пор}}^0 + K\sqrt{|2\phi_F + U_{\text{вых}}^0|} - K\sqrt{|2\phi_F|} = 4,5 + 1,2 \cdot \sqrt{0,6 + 1} - 1,2 \cdot \sqrt{0,6} = 5,088 \text{ В}.$$

Тоді нове значення коефіцієнта

$$m = \frac{U_n}{2(U_{\text{см}} - U_{\text{пор}}) - U_n} = \frac{15}{2 \cdot (27 - 5,088) - 15} = 0,5204.$$

У формулі передавальної характеристики $U_{\text{вых}} = U_{\text{вых}}^0 = 1 \text{ В}$; $U_{\text{вх}} = 10 \text{ В}$; $L_H = 185 \text{ мкм}$ і $W_H = 10 \text{ мкм}$. Так як транзистори T_2 і T_3 – активні і мають крутизну набагато більшу, ніж T_1 , тому довжина каналу вибирається мінімальною, виходячи із конструктивно-технологічних обмежень. У даному випадку – це мінімальна відстань між дифузійними областями p^+ -типу, рівна $L_I = 15 \text{ мкм}$, де $L_I = L_E = L_2 = L_3$.

Ширина каналу еквівалентного транзистора

$$W_9 = W_I = \frac{\left(1 - \frac{U_{\text{вых}}}{U_n}\right) \cdot \left(1 - m \frac{U_{\text{вых}}}{U_n}\right)}{m \frac{L_H}{L_I W_H} \cdot \left[2 \cdot \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{пор}}^0}{U_n} \cdot \frac{U_{\text{вых}}}{U_n} - \left(\frac{U_{\text{вых}}}{U_n}\right)^2\right]} = \frac{\left(1 - \frac{1}{15}\right) \cdot \left(1 - 0,5204 \cdot \frac{1}{15}\right)}{0,5204 \cdot \frac{185}{15 \cdot 10} \cdot \left[2 \cdot \frac{10 - 4,5}{15} \cdot \frac{1}{15} - \left(\frac{1}{15}\right)^2\right]} = 31,58 \text{ мкм}.$$

Тоді $W_2 = W_3 = 2W_9 = 63,167 \text{ мкм}$. Заокруглюємо до найближчого найбільшого значення і отримуємо $W_2 = W_3 = 65 \text{ мкм}$.

Приклад 2

Розрахувати схему інвертора, зображену на рис. 15. Вихідні дані: технологія p -каналу МДН ІС з полікремнієвим затвором; $U_{\text{пор}}^0 = -2,5 \text{ В}$; $U_n = -15 \text{ В}$; $U'_{\text{вх}} = -8 \text{ В}$; $C_H = 0,3 \text{ нФ}$; $K = 1,2 \text{ В}^{1/2}$; $2\phi_F = -0,58 \text{ В}$; $\mu = 140 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$; $C_{\text{ox}} = 3 \cdot 10^{-8} \text{ Ф} / \text{см}^2$; $t_{\text{выкл}} = 0,25 \text{ мкс}$; $U_{\text{вых}}^0 = -1 \text{ В}$.

Як і в попередньому випадку, розрахунок розпочинається з визначення розмірів навантажувального транзистора T_1 , а замість від'ємних значень напруг використовуються їх абсолютні значення.

Коли затвір T_1 з'єднаний зі стоком, транзистор автоматично виявляється у режимі, що відповідає пологій ділянці вольт-амперних характеристик, так як $U_z = U_n$ і $|U_n - U_{\text{пор}}| < |U_n|$.

Час вимкнення

$$t_{\text{выкл}} = \frac{2C_H L_H}{\mu C_{\text{ox}} W_H} \cdot \frac{|U_{\text{max}} - U_{\text{исх}}|}{(|U_{\text{вх}} - \bar{U}_{\text{пор}} - U_{\text{max}}|) \cdot (|U_{\text{вх}} - \bar{U}_{\text{пор}} - U_{\text{исх}}|)},$$

де

$$U_{\text{max}} = U_{\text{вх}} - U_{\text{пор}}^0 - K\sqrt{|U_{\text{вх}} - U_{\text{пор}}^0|} = U_n - U_{\text{пор}}^0 - K\sqrt{|U_n - U_{\text{пор}}^0|},$$

яке дорівнює

$$U_{\text{max}} = 15 - 2,5 - 0,95 \cdot \sqrt{15 - 2,5} = -9,14 \text{ В}.$$

Вихідна напруга $U_{\text{исх}} = U_{\text{вых}}^0 = 1 \text{ В}$.

Усереднене значення порогової напруги

$$\bar{U}_{\text{пор}} = U_{\text{пор}}^0 - K\sqrt{\frac{2(2\phi_F) + (U_{\text{max}} - U_{\text{исх}})}{2}} + K\sqrt{|2\phi_F|} = -2,5 - 0,95\sqrt{\frac{0,58 \cdot 2 + (9,14 - 1)}{2}} + 0,95\sqrt{0,58} = -3,825 \text{ В}.$$

Як і у попередньому випадку, обираємо ширину каналу T_1 мінімальною, виходячи із конструктивно-технологічних обмежень, в даному випадку - із мінімальної ширини активної області – 10 мкм , тобто $W_H = 10 \text{ мкм}$. Тоді

$$L_H = \frac{t_{\text{выкл}} \mu C_{ox} W_H (|U_{\text{вх}} - \bar{U}_{\text{пор}} - U_{\text{max}}|) \cdot (|U_{\text{вх}} - \bar{U}_{\text{пор}} - U_{\text{исх}}|)}{2C_H (|U_{\text{max}} - U_{\text{исх}}|)} =$$

$$= \frac{0,25 \cdot 10^{-6} \cdot 140 \cdot 3 \cdot 10^{-8} \cdot 10^{-3} \cdot (15 - 3,825 - 9,14) \cdot (15 - 3,825 - 1)}{2 \cdot 0,3 \cdot 10^{-12} \cdot (9,14 - 1)} = 4,45 \cdot 10^{-3} \text{ см} = 44,5 \text{ мкм}.$$

Потрібно округлити L_H до найближчого меншого значення виходячи із мінімального кроку розміру на кресленні технології кристала. Наприклад, для масштабу 400:1 одному сантиметру креслення (1,0 см) відповідає 2,5 мкм на кристалі, тобто в цьому випадку округлене значення L_H має бути кратним 2,5 мкм, тобто $L_H = 42,5 \text{ мкм}$.

Розміри активного транзистора T_2 визначають також виходячи із вимог забезпечення максимально допустимого значення рівня логічного нуля $U_{\text{вых}}^0$ на виході інвертора за формулами для передавальних характеристик МДН-інвертора.

Для вибору виду передавальної характеристики визначаємо в якій області ВАХ знаходиться транзистор при подачі на його вхід напруги $U_{\text{вх}} > U_{\text{пор}}^0$. При $U_{\text{вх}} = U_3$ маємо, що $|U_3 - U_{\text{пор}}^0| \geq |U_c|$, де $U_c = U_{\text{вых}}^0$. Тоді $|8 - 2,5| = 5,5 > |-1| = 1$.

Таким чином, вибирається рівняння передавальної характеристики для навантажувального транзистора у пологій області, а активного – у крутій області вольт-амперних характеристик, тобто

$$\left[1 - \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{см}} - U_{\text{пор}}}\right]^2 = \frac{W_I L_H}{W_H L_I} \cdot \left[2 \left(\frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{пор}}^0}{U_{\text{см}} - U_{\text{пор}}}\right) \cdot \left(\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{см}} - U_{\text{пор}}}\right) - \left(\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{см}} - U_{\text{пор}}}\right)^2\right],$$

де $U_{\text{см}} = U_n$; $U_{\text{вых}} = U_{\text{вых}}^0$; $U_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}^1$.

Порогова напруга транзистора T_1 , що відповідає напрузі на його витці $U_{\text{и}} = U_{\text{вых}}^0$,

$$U_{\text{пор}} = U_{\text{пор}}^0 K \sqrt{2\phi_F + U_{\text{вых}}^0} + K \sqrt{2\phi_F} = -2,9706 \text{ В}.$$

Як і у попередньому випадку, довжина каналу обирається мінімальною виходячи із конструктивно-технологічних обмежень. В даному випадку – це мінімальна ширина полікремнієвої шини $L_I = L_1 = L_2 = 10 \text{ мкм}$. Ширина каналу транзистора T_2 :

$$W_I = \frac{W_H L_I \cdot [U_n - U_{\text{пор}} - U_{\text{вых}}^0]^2}{L_H \cdot [2U_{\text{вых}}^0 (U_{\text{вх}}^1 - U_{\text{пор}}^0) - (U_{\text{вых}}^0)^2]} = \frac{10^{-3} \cdot 10^{-3} \cdot [15 - 2,9706 - 1]^2}{42,5 \cdot 10^{-4} \cdot [2 \cdot 1 \cdot (8 - 2,5) - 1]} = 2,862 \cdot 10^{-3} \text{ см} = 28,62 \text{ мкм}.$$

Округляємо отримане значення W_I до найближчого більшого, кратного 2,5 мкм, тобто до $W_I = 30 \text{ мкм}$.

Приклад 3

Розрахувати інвертор, зображений на рис. 16.

Вихідні дані: технологія n -канальних МДН ІС з полікремнієвим затвором;
 $U_{\text{пор}1} = U_{\text{пор.встр}} = -3,5 \text{ В}$; $U_{\text{пор}2} = U_{\text{пор.инд}} = 0,8 \text{ В}$; $U_n = 5 \text{ В}$; $U_{\text{вх}} = 2,4 \text{ В}$; $C_H = 0,3 \text{ нФ}$;
 $K = 0,7 \text{ В}^{1/2}$; $2\phi_F = 0,56 \text{ В}$; $\mu = 650 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$; $C_{ox} = 4 \cdot 10^{-8} \text{ Ф} / \text{см}^2$; $t_{\text{выкл}} = 0,1 \text{ мкс}$;
 $U_{\text{вых}} = 0,4 \text{ В}$.

По аналогії до попередніх прикладів спочатку розраховуються розміри навантажувального МДН-транзистора з вбудованим каналом за часом вимкнення інвертора згідно з формулою

$$t_{\text{выкл}} = \frac{2L_H C_H}{W_H C_{ox} \mu (U_{\text{пор}1} / U_n)^2 U_n}.$$

Обирається мінімальне значення ширини каналу транзистора з вбудованим каналом, рівне мінімальній ширині активної області, за конструктивно-технологічними обмеженнями, тобто $W_H = W_I = 8 \cdot 10^{-4} \text{ см}$.

Довжина каналу транзистора T_1 :

$$L_H = \frac{t_{\text{выкл}} W_H C_{\text{ox}} \mu (U_{\text{пор}1} / U_n)^2 U_n}{2 C_H} = \frac{0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 8 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 10^{-8} \cdot 650 \cdot (-3,5/5)^2 \cdot 5}{2 \cdot 0,3 \cdot 10^{-12}} = 8,493 \cdot 10^{-3} \text{ см} = 84,9 \text{ мкм}.$$

Округляємо до найближчого меншого значення, кратного 2 мкм (приймаємо при цьому масштаб топологічного креслення 500:1, тобто 2 мкм у 1 см): $L_H = 84 \text{ мкм}$.

Розміри активного транзистора T_2 визначаються по передавальній характеристиці інвертора:

$$\frac{W_I}{L_I} \cdot 2 \cdot \left[(U_{\text{ex}} - U_{\text{пор}2}) \cdot U_{\text{вых}} - \frac{U_{\text{вых}}^2}{2} \right] = \frac{W_H}{L_H} \cdot (U_{\text{вых}} - U_{\text{пор}1})^2,$$

де $U_{\text{вых}} = U_{\text{вых}}^0$; $U_{\text{ex}} = U_{\text{ex}}^1$.

Обирають мінімальну довжину каналу активного транзистора L_I , рівну конструктивно-технологічному обмеженню по ширині полікремнієвої шини, тобто: $L_I = L_2 = 8 \cdot 10^{-4} \text{ см}$.

Тоді

$$W_I = W_2 = \frac{L_I W_H \cdot (U_{\text{вых}}^0 - U_{\text{пор}1})^2}{L_H \cdot 2 \cdot \left[(U_{\text{ex}}^1 - U_{\text{пор}2}) \cdot U_{\text{вых}}^0 - \frac{1}{2} \cdot (U_{\text{вых}}^0)^2 \right]} = \frac{8 \cdot 10^{-4} \cdot 8 \cdot 10^{-4} \cdot (0,4+3,3)^2}{84 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot \left[(2,4-0,8) \cdot 0,4 - \frac{0,4^2}{2} \right]} = 10,34 \cdot 10^{-4} \text{ см}.$$

Округляємо $W_I = 10,34 \text{ мкм}$ до найбільшого числа, кратного 2 мкм, тобто $W_I = 12 \text{ мкм}$.

Приклад 4

Розрахунок вихідного каскаду (рис. 17), що працює у парафазному режимі.

Вихідні дані: технологія n -каналу МДН ІС з полікремнієвим затвором; $U_{\text{пор}0} = -2,4 \text{ В}$; $U_n = -15 \text{ В}$; $U_{\text{ex}1} = -12 \text{ В}$; $U_{\text{ex}2} = -9 \text{ В}$; $C_H = 100 \text{ нФ}$; $C_{\text{ox}} = 3 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2$; $t_{\text{выкл}} = 0,3 \text{ мкс}$; $t_{\text{вкл}} = 0,2 \text{ мкс}$; $K = 0,9 \text{ В}^{1/2}$; $2\phi_F = -0,6 \text{ В}$; $\mu = 140 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$; $U_{\text{вых}}^0 = -0,5 \text{ В}$.

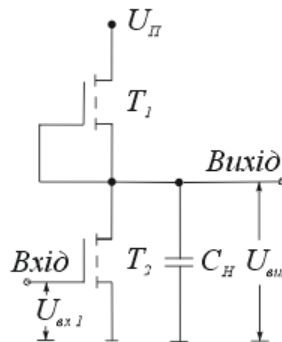


Рис. 17.

Розміри верхнього транзистора T_1 визначають за часом вимкнення. Приводимо режим роботи T_1 за умовою $|U_z - U_{\text{пор}}| > |U_c|$, де $U_z = U_{\text{ex}1}$, $U_c = U_n$, а порогова напруга:

$$U_{\text{пор}} = U_{\text{пор}0} + K \sqrt{|U_{\text{max}} + 2\phi_F|} + K \sqrt{|2\phi_F|},$$

де – максимальна напруга на виході схеми:

$$U_{\text{max}} = U_{\text{ex}1} - U_{\text{пор}}^0 + K \sqrt{|U_{\text{ex}1} - U_{\text{пор}0}|} = -12 + 2,4 + 0,9 \cdot \sqrt{|-12 - (-2,4)|} = -6,81 \text{ В}.$$

Звідси:

$$U_{\text{пор}} = -2,4 - 0,9 \cdot \sqrt{|-6,81 + 0,6|} + 0,9 \cdot \sqrt{|0,6|} = -4,153 \text{ В}.$$

Таким чином, $|-12+2,4|=9,6 < |-15|=15 \text{ В}$, тобто транзистор T_1 знаходиться в пологій частині області вольт-амперних характеристик. Тому

$$t_{\text{выкл}} = \frac{C_H 2L_H}{\mu C_{ox} W_H} \cdot \frac{|U_{\text{max}} - U_{\text{исх}}|}{(|U_{\text{ex}} - U_{\text{пор}} - U_{\text{max}}|) \cdot (|U_{\text{ex}} - \bar{U}_{\text{пор}} - U_{\text{исх}}|)},$$

де $U_{\text{исх}} = U_{\text{вых}}^0$; $U_{\text{ex}} = U_{\text{ex1}}$; $U_{\text{max}} = -6,81 \text{ В}$.

Оскільки транзистори мають швидко перезаряджати велику ємність навантаження C_H , вони повинні мати високу крутизну або ширину каналу. Тому як для T_1 , так і для T_2 обирається мінімальна довжина каналу, що відповідає конструктивно-технологічним обмеженням, тобто $L_1 = L_2 = 10 \text{ мкм}$.

Усереднене значення порогової напруги

$$\bar{U}_{\text{пор}} = U_{\text{пор}}^0 - K \sqrt{\left| \frac{2(2\phi_F) + (U_{\text{max}} - U_{\text{исх}})}{2} \right|} + K \sqrt{|2\phi_F|} = -2,4 - 0,9 \cdot \sqrt{\frac{0,62 + (6,81 - 0,5)}{2}} + 0,9 \cdot \sqrt{0,6} = -3,447 \text{ В}.$$

Тоді для

$$W_H = W_1 = \frac{C_H 2L_H \cdot (|U_{\text{max}} - U_{\text{исх}}|)}{\mu C_{ox} t_{\text{выкл}} \cdot (|U_{\text{ex}} - U_{\text{пор}} - U_{\text{max}}|) \cdot (|U_{\text{ex}} - \bar{U}_{\text{пор}} - U_{\text{исх}}|)}$$

отримуємо

$$W_H = W_1 = \frac{1 \cdot 10^{-10} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot (6,81 - 0,5)}{140 \cdot 3 \cdot 10^{-8} \cdot 0,3 \cdot 10^{-6} \cdot (12 - 3,447 - 6,81) \cdot (12 - 3,477 - 0,5)} = 7,1356 \cdot 10^{-2} \text{ см} = 713,5 \text{ мкм}.$$

Заокруглюємо до найближчого значення, кратного, наприклад, до 5 мкм , тобто $W_1 = 715 \text{ мкм}$.

Розміри нижнього транзистора T_2 визначаються за часом увімкнення, тобто за часом розряду ємності C_H через відкритий транзистор T_2 . При цьому необхідно виконати умови $|U_{\text{вых}}| \leq |U_{\text{ex}} - U_{\text{пор0}}|$, тобто $|U_{\text{ex}} - U_{\text{пор0}}| = |U_{\text{ex2}} - U_{\text{пор0}}| = 9 - 2,4 = 6,4 > |U_{\text{вых}}| = 0,5 \text{ В}$.

Таким чином, протягом всього процесу увімкнення транзистора, T_2 знаходиться в крутій області характеристик і тому використовується вираз

$$t_{\text{вкл}} = \frac{C_H L_I}{\mu C_{ox} W_I} \cdot \frac{1}{2(|U_{\text{ex}} - U_{\text{пор0}}|)} \cdot \ln \left[\frac{2 \cdot (|U_{\text{ex}} - U_{\text{пор0}}|) - |U_{\text{ост}}|}{|U_{\text{ост}}|} \right],$$

де $U_{\text{ex}} = U_{\text{ex2}}$, $U_{\text{ост}} = U_{\text{вых}}^0$.

Звідси

$$W_I = \frac{C_H L_I}{\mu C_{ox} t_{\text{вкл}}} \cdot \frac{\ln \left[\frac{2(|U_{\text{ex}} - U_{\text{пор0}}|) - |U_{\text{вых}}^0|}{|U_{\text{вых}}^0|} \right]}{2 \cdot (|U_{\text{ex2}} - U_{\text{пор0}}|)} = \frac{1 \cdot 10^{-10} \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot \ln \left[\frac{2(9 - 2,4) - 0,5}{0,5} \right]}{140 \cdot 3 \cdot 10^{-8} \cdot 0,2 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot (9 - 2,4)} = 2,917 \cdot 10^{-2} \text{ см}.$$

Округляємо $W_I = W_2 = 291,7 \text{ мкм}$ до найближчого більшого значення, яке кратне 5 мкм , тобто отримуємо $W_I = W_2 = 295 \text{ мкм}$.

4. РОЗРАХУНОК І ТИПОВІ КОНСТРУКЦІЇ ЗАХИСНОГО ПРИСТРОЮ МІКРОСХЕМИ ВІД СТАТИЧНОЇ ЕЛЕКТРИКИ

МДН-транзистори мають дуже високий вхідний опір, що визначається паразитним струмом підзатворного діелектрика. Електрична міцність SiO_2 , що використовується в більшості випадків у якості цього діелектрика, складає для типових товщин 0,06...0,15 мкм від $6 \cdot 10^6$ до $1 \cdot 10^7$ В/см, тобто 36...150 В.

Поява на вході МДН-транзистора напруг, що перевищують названі значення, приводить до пробую підзатворного діелектрика і відмови мікросхеми. Основними джерелами таких напруг на входах мікросхем можуть бути заряди статичної електрики і сплески напруги у колах живлення при їх комутації. Заряд статичної електрики створюється людиною або тарою для упаковки ІС. Статичний заряд людини складає від 1 кВ до декількох тисяч вольт (особливо при одязі із синтетичних тканин). Тому на входах МДН ІС необхідно ставити спеціальні пристрої захисту від статичної електрики. Принцип дії цих пристроїв подібний до роботи схем стабілізації напруги, що застосовують стабілітрони (діоди Зенера), і ілюструються на рис. 18, а, б. Тут R_6 – струмообмежуючий опір, D – стабілізуючий діод, R_0 – динамічний опір діода в режимі стабілізації, який починає відкриватись при напрузі пробую $U_{проб}$. Перетин вольт-амперних характеристик діода і опору R_6 при зовнішній напрузі $U_{вх}$ встановлює робочу точку схеми захисту, що відповідає напрузі на затворі $U_{затв}$ захисного МДН-транзистора. У зв'язку з кінцевим значенням динамічного опору діода при збільшенні напруги на вході схеми $U_{вх}$ одночасно збільшується і $U_{затв}$. При зменшенні R_0 зменшується діапазон змін $U_{затв}$ для того ж діапазону змін $U_{вх}$.

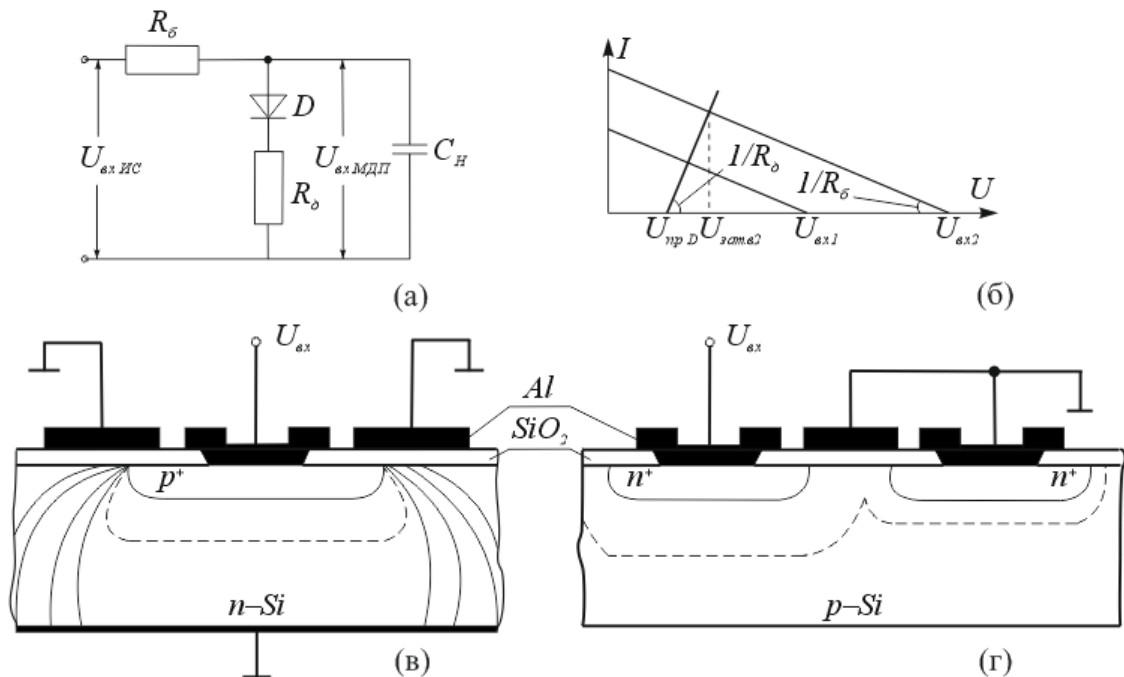


Рис. 18.

Основними різновидами пристроїв захисту являються: діод, що керується за затвором (рис. 18, в), і МДН-транзистор з індукованим каналом, затвір якого з'єднаний з витоком і підключений до виводу "Корпус", а на стік подається вхідна напруга (рис. 18, г).

Напруга пробую таких структур визначається виразом

$$U_{проб} = 3d_{ox}E_{кр} + U_{зз} - |U_{пор}| \quad (47)$$

де d_{ox} – товщина шару оксида під затвором захисту (см); $E_{кр} = 1,2 \cdot 10^6$ В/см – критичне поле, що визначає початок ударної іонізації у зоні збіднення кремнію; $U_{зз}$ – напруга на

затворі захисту; $U_{пор}$ – порогова напруга системи захисту, рівна пороговій напрузі МДН-транзистора, якщо d_{ox} рівна товщині підзатворного оксиду МДН-транзистора. Тоді порогова напруга на затворі захисного МДН-транзистора

$$U_{затв} = U_{проб} + (U_{вх} - U_{проб}) \cdot \frac{R_o}{R_o + R_g} \quad (48)$$

Ця напруга завжди повинна бути

$$U_{затв} \leq \frac{2}{3} \cdot U_{проб, SiO_2} \quad (48a)$$

Друга після $U_{проб}$ діода захисту найважливіша характеристика – динамічний опір R_o – не може бути визначений простими розрахунками. Для визначення необхідної ширини каналу МДН-транзистора захисту або ширини периметра діода (W) використовується графік (рис. 19). Вплив довжини каналу L МДН-транзистора незначний і може бути врахований графіком (рис. 20). Типові довжини каналів L складають 6...8 мкм.

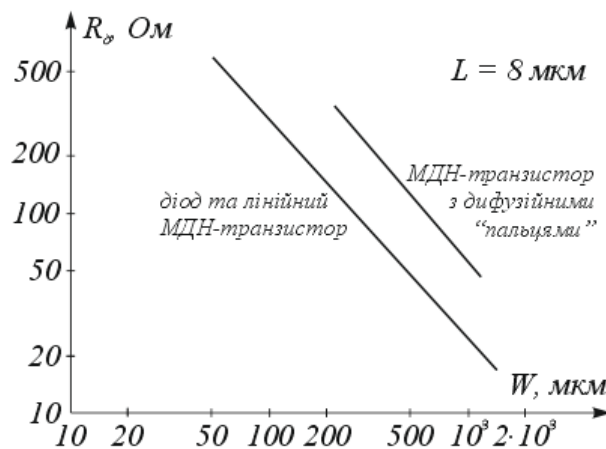


Рис. 19.

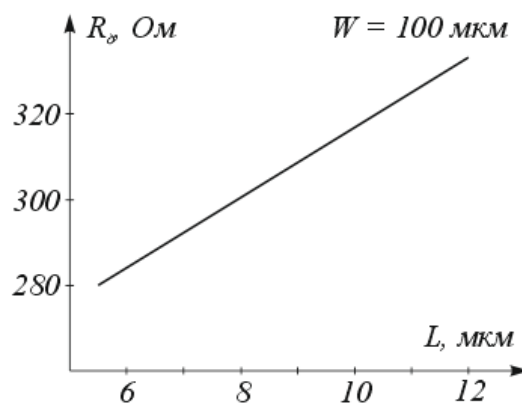


Рис. 20.

На рис. 21 і 22 показані типові конструкції схем захисту діодної (для p -канальних приладів) і транзисторної (для n -канальних приладів). З метою збільшення ширини каналу можна використовувати "пальцеподібну" конструкцію, подібну МДН-транзисторам з гребінчастою структурою. За рахунок опору дифузійних "пальців" динамічний опір приладу (на одиницю периметра) зростає. На рис. 19 зображений графік залежності R_o від W для довжини "пальця", рівній довжині каналу.

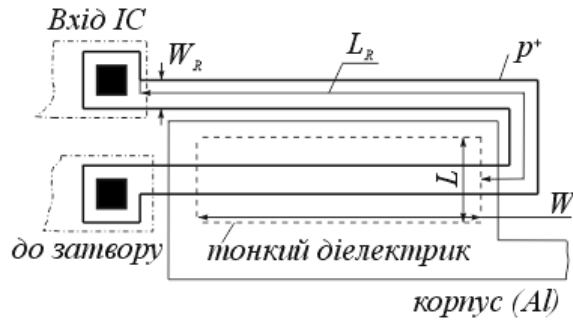


Рис. 21.

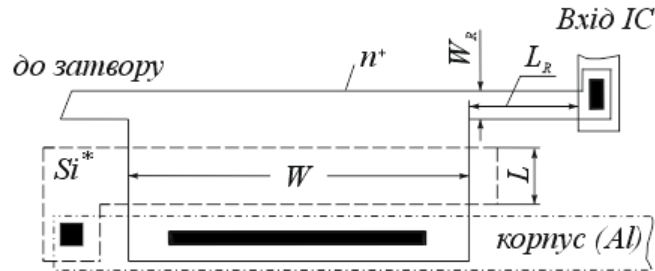


Рис. 22.

Порядок розрахунку

1. Розрахунок $U_{проб}$ приладу захисту для даного технологічного варіанту по (47).
2. Визначення максимально допустимого значення струмообмежуючого опору $R_{\bar{o}}$ за максимальною робочою частотою схеми $f_{роб}$ (49) і заданною ємністю $C_{вх}$ схеми (50).
3. Розрахунок необхідного значення динамічного опору $R_{\bar{o}}$ приладу захисту із співвідношення (48) і (48а):

$$f_{роб} \approx \frac{2}{\Sigma(t_{выкл}) + t_{вкл.вых}}; \quad (49)$$

$$\tau_{вх} = R_{\bar{o}} \cdot C_{вх} \leq 0,01 \cdot f_{роб}^{-1}. \quad (50)$$

4. Визначення по $R_{\bar{o}}$ ширини каналу (довжини периметра) W структури захисту із рис. 19.
5. Виходячи із мінімальної ширини дифузійного резистора і розрахованого значення $R_{\bar{o}}$ визначається довжина струмообмежуючого опору при заданому питомому опорі дифузійного резистора.

Приклад. Розрахувати захисний прилад МДН ІС, виконаний по p -канальній технології з полікремнієвим затвором. Вихідні дані: $d_{ox} = 0,145 \text{ мкм}$; $U_{пор0} = 4,5 \text{ В}$; $U_{зз} = 0$; $C_{вх} = 12 \text{ пФ}$; $\rho_{Si^{n+}} = 100 \text{ Ом}$; $\Sigma(t_{выкл}) + t_{вкл.вых} = 0,8 \text{ мкс}$; $U_{проб. SiO_2} = 120 \text{ В}$; $U_{вх} = 1500 \text{ В}$.

Розрахуємо напругу пробою приладу захисту:

$$U_{проб} = 3 \cdot d_{ox} \cdot E_{кр} + U_{зз} - |U_{пор}| = 3 \cdot 1,45 \cdot 10^{-5} \cdot 1,2 \cdot 10^6 + 0 - |-4,5| = 47,7 \text{ В}.$$

Визначимо максимальну робочу частоту схеми:

$$f_{роб} = \frac{2}{\Sigma(t_{выкл}) + t_{вкл.вых}} = \frac{2}{0,8 \cdot 10^{-6}} = 2,5 \cdot 10^6 \text{ Гц}.$$

За заданим значенням вхідної ємності визначимо струмообмежуючий опір:

$$R_{\bar{o}} \leq 0,01 \cdot C_{вх}^{-1} f_{роб}^{-1} = \frac{0,01}{2 \cdot 10^{-12} \cdot 2,5 \cdot 10^6} = 2000 \text{ Ом}.$$

Заданою значенням $R_{\bar{o}} = 1,8 \text{ кОм}$.

Для розрахунку необхідного динамічного опору $R_{\bar{o}}$ попередньо визначимо максимально допустиму напругу на затворі вхідного транзистора:

$$U_{затв} \leq \frac{2}{3} \cdot U_{проб. SiO_2} = \frac{2 \cdot 120}{3} = 80 \text{ В}.$$

Нехай $U_{затв} = 80 \text{ В}$. Із співвідношення (48) визначимо

$$R_o = \frac{U_{затв} - U_{проб}}{U_{вх} - U_{проб}} \cdot R_o = \frac{80 - 47,7}{1500 - 47,7} \cdot 1,8 \cdot 10^3 = 40,03 \text{ Ом}.$$

Із графіка на рис. 19 визначаємо W – довжину периметра захисту: $W = 500 \text{ мкм}$.

Виходячи із мінімально допустимої ширини дифузійної шини для даної технології $W_R = 10 \text{ мкм}$ і питомого опору дифузійної шини $\rho_S = 100 \text{ Ом}$, отримуємо довжину струмообмежуючого опору: $L_R = R_o W_R / \rho_S = \frac{1,8 \cdot 10^3 \cdot 10}{100} = 180 \text{ мкм}$.

5. ПОБУДОВА ТОПОЛОГІЧНОГО ЗОБРАЖЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНОЇ МІКРОСХЕМИ НА ОСНОВІ МДН-ТРАНЗИСТОРІВ

5.1. Побудова топології МДН-транзисторів та вузлів ІМС

Кожен технологічний варіант виготовлення МДН-інтегральної схеми використовує свої типові конструкції транзисторів і має свої особливості при компонуванні топологічної схеми.

На рис. 23 зображені конструкції МДН-транзисторів з алюмінієвим затвором, виконані по p -канальній технології. Транзистори, що виконують функцію навантаження, як правило, мають довжину каналу, значно більшу його ширини. На рис. 23 показаний такий транзистор, у якого довжина каналу обмежується відстанню між дифузійними областями 1 стоку та виток, а ширина каналу вибирається мінімально допустимою по конструктивним обмеженням і визначається шириною області тонкого оксиду 2. Ця область звичайно робиться вужчою, ніж дифузійні області стоку та виток, а тонкий оксид затвору перекривається алюмінієвим затвором 4. Величина перекриття визначається конструктивно-технологічними обмеженнями. Якщо розрахована довжина каналу такого транзистора виявляється дуже великою, каналу надається змієподібна форма (рис. 23, б). Для активних транзисторів довжина каналу вибирається мінімально допустимою по конструктивних обмеженнях, а ширина може визначатись або шириною дифузійних областей стоку та виток, якщо тонкий оксид ширший, ніж вони (рис. 23, в), або шириною шару тонкого оксиду, якщо він вужчий, ніж дифузійні області стоку та виток (рис. 23, г).

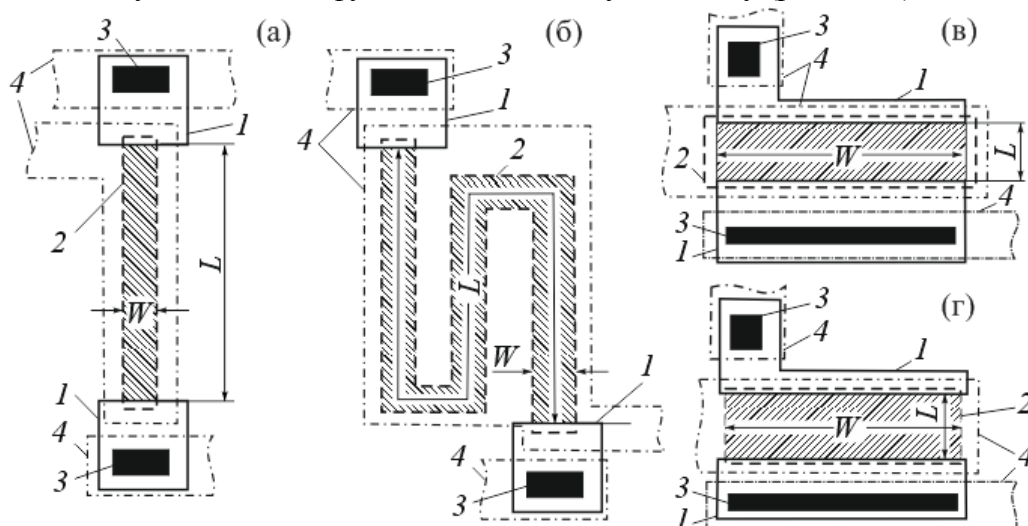


Рис. 23.

Допускається робити межі тонкого оксиду і дифузійних областей стоку та виток в стик по довжині каналу для зменшення паразитних ємностей затвір-стік і затвір-витік, як показано на рис. 23, г. Якщо розрахована ширина каналу виявляється надто великою, то транзистор виконується у вигляді гребінки (рис. 24, а). В схемах іноді необхідно ставити спеціальні ємності. На рис. 24, б показана конструкція такої ємності.

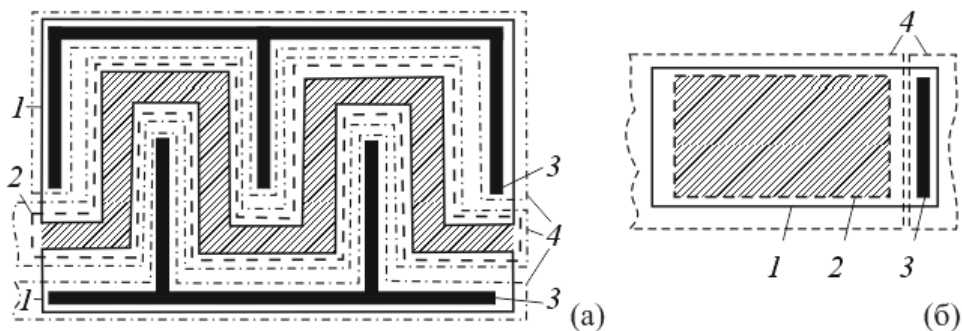


Рис. 24.

Ємність має нижню обкладку, утворену p^+ -областю 1, над якою вирощений тонкий оксид 2, менший за розмірами, ніж p_1^+ над яким лежить друга обкладка із алюмінію 4. До нижньої обкладки зроблений контакт 3 з алюмінієвим виводом 4.

На рис. 25, а зображені електрична схема логічного елемента АБО-НІ на два входи В і С і елемента І-НІ на входи А і ВС, тобто $A(B+C)$, а на рис. 25, б – топологія цього елемента.

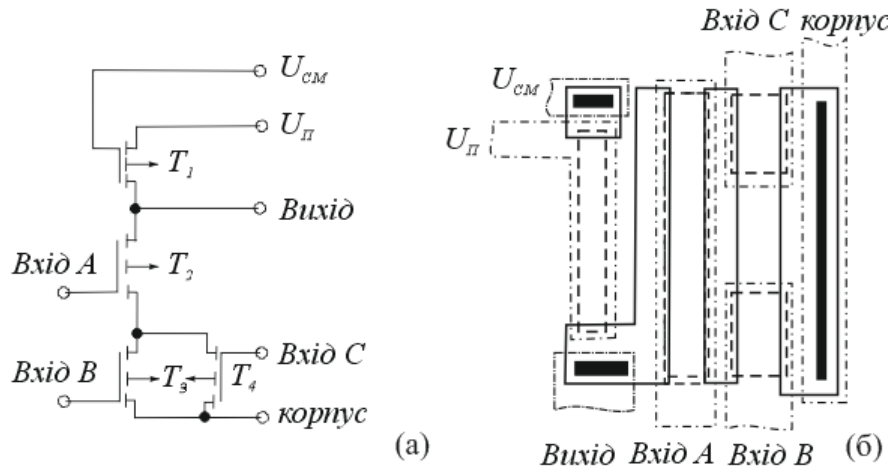


Рис. 25.

Технологічні процеси МДН ІС з полікремнієвим затвором накладають особливості на конструкцію елементів та вузлів схеми. На рис. 26, а показано навантажувальний транзистор із затвором та стоком, що використовує алюмінієву перемичку. Суцільною лінією показана область тонкого оксиду, що охоплює стік, затвір і витік; пунктиром – область полікремнієвого затвора; штрих-пунктирною лінією – алюмінієві міжз'єднання; чорні області – контактні вікна. На рис. 26, б показана конструкція навантажувального транзистора з дуже довгим каналом, що має змієподібну геометрію з шириною каналу W_k і довжиною, виміряною по його середині між краями полікремнієвого затвора у pn -переходів витоку та стоку. Тут затвір не з'єднаний зі стоком. На рис. 26, в показаний МДН-транзистор, що має ширину каналу, більшу, ніж довжину. Такі транзистори частіше за все використовуються у якості активних елементів схеми. На рис. 27, а, б показані МДН-транзистори з дуже великою шириною каналу. Тут транзистор має гребінчасту структуру. Дифузійні області витоку та стоку закорочені алюмінієм для зменшення шкідливого впливу їх опору на крутизну транзистора. На рис. 27, б конструкція такого транзистора ускладнена для економії площі кристалу. Довгі полікремнієві затвори закорочені алюмінієм на торцях транзистора з метою зменшення опору затвора і покращення його частотних характеристик.

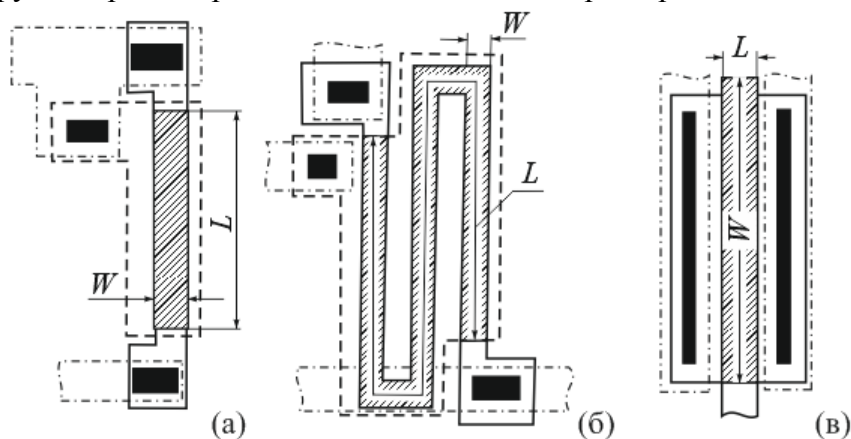


Рис. 26.

На рис. 28, а, б показані відповідно електрична схема і топологія тригера, виконаного по технології з полікремнієвим затвором.

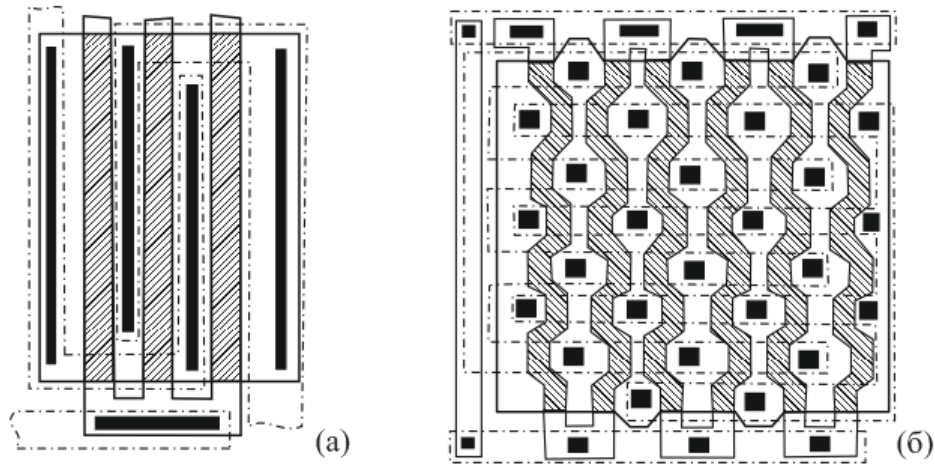


Рис. 27.

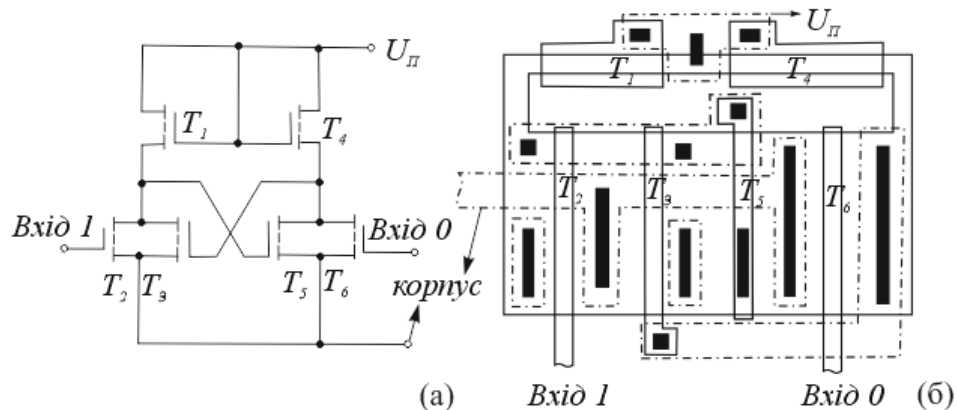


Рис. 28.

Для технологічного варіанту n -каналних МДН ІС з полікремнієвим затвором, що використовує транзистори з індукованим каналом і вбудованим каналом і неметалеві контакти між полікремнієм і n^+ -областями, є свої конструктивно-технологічні особливості.

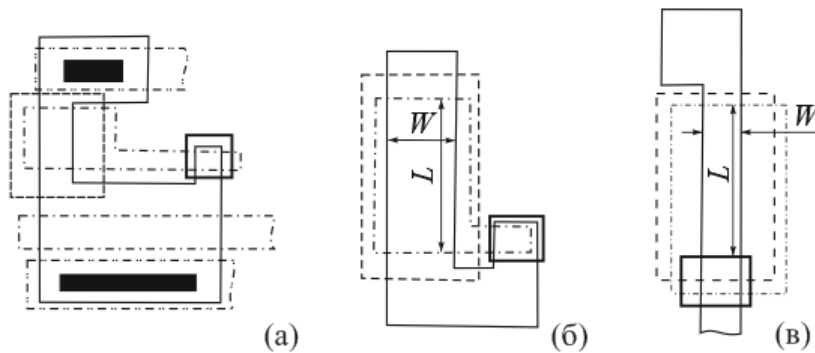


Рис. 29.

На рис. 29 зображена топологія інвертора і топологія двох навантажувальних транзисторів з вбудованими каналами і затвором, з'єднаним з витоком транзистора. На рис. 29, а суцільною лінією показана межа активної області, сформована на першій фотолітографії, штрих-пунктирною лінією – межа полікремнієвого затвора; пунктирною – межа області легування каналу МДН-транзистора з вбудованим каналом; товстою суцільною лінією – межа області неметалевого контакту; штрихом з двома точками – алюмінієві міжз'єднання. На рис. 29, б ширина каналу транзистора обмежена краями активної області, а його довжина – краями полікремнієвого затвора, що примикає до n^+ -області витоку та стоку. На рис. 29, в край каналу в n^+ -області витоку обмежений краєм неметалевого контакту.

Метод контактної фотолітографії використовує візуальний метод суміщення, зображений на кремнієвій пластині та фотошаблоні. Для зміщення застосовують спеціальні фігури або мітки суміщення (реперні мітки). Конструкція цих фігур повинна забезпечувати:

- можливість суміщення в двох взаємно перпендикулярних напрямках;

– необхідну точність суміщення, що визначається зазором між фігурами на пластині та фотошаблоні;

– послідовність суміщень, що відповідає найбільш критичному по відношенню до процесу суміщення поєднання фотолітографічних шарів, характерному для даного технологічного процесу і даної інтегральної схеми.

В розділі конструктивно-технологічних обмежень дано послідовності суміщення шарів для кожного технологічного процесу.

Конструкція фігур також визначається тим, який фоторезист – позитивний чи негативний – використовується у даному процесі. В табл. 2 приведена тональність фігур на фотошаблоні при використанні негативного (НФР) і позитивного (ПФР) фоторезисту для кожної фотолітографії основних чотирьох технологічних процесів виготовлення МДН ІС. Позначення “Т” відповідає темному рисунку фігур на світлому полі, а позначення “С” – світлому рисунку на темному полі.

Таблиця 2

<i>p</i> -МДНТ з Al-затвором			<i>p</i> -МДНТ з полікремнієвим затвором			<i>n</i> -МДНТ з полікремнієвим затвором		
Номер НФР, ПФР шару			Номер НФР, ПФР шару			Номер НФР, ПФР шару		
1	Т	С	1	Т	С	1	С	Т
2	Т	С	2	С	Т	2	Т	С
3	Т	С	3	Т	С	3	Т	С
4	С	Т	4	С	Т	4	Т	С
						5	С	Т
						6	Т	С
						7	С	Т
						8	Т	С

На рис. 30 показані типові конструкції фігур суміщення для НФР. Фігури суміщення відносяться до випадку *n*-канальної технології з Si^* -затвором, в тому числі пара “а” і “б” відноситься відповідно до 1-2 і 2-3-го шарів, а пара “г” і “д” – до 3-4-го шарів. На рис. 30, в показана картина суміщення рисунка “С” на пластині після 1-ої фотолітографії з фігурою на фотошаблоні 4-го шару. Розміри фігур a_1 , a_2 , b_1 і b_2 залежать від виду технології і для *p*-канальних технологій складають відповідно 36, 28, 40 і 20 мкм, а для *n*-канальної – 40, 20, 42, 5 і 15 мкм.

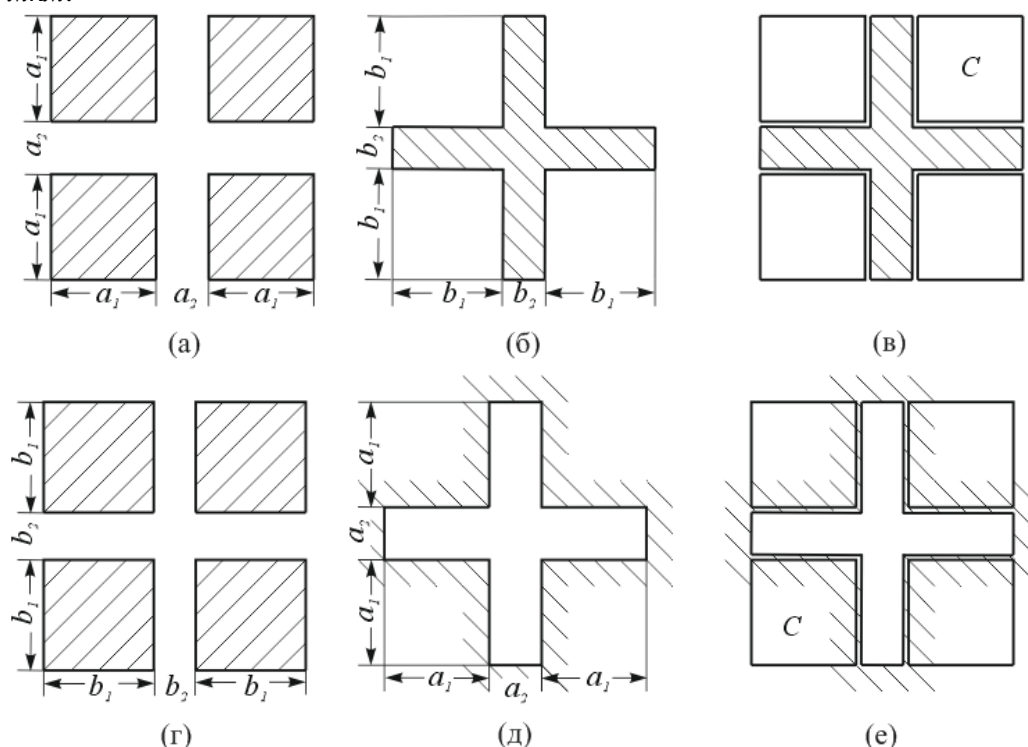


Рис. 30.

5.2. Рекомендації щодо компоновання топології мікросхеми

При розміщенні активних і допоміжних елементів на кристалі варто керуватись рядом загальноприйнятих положень, направлених на економію площі кристала, зручність збирання кристала в корпус, мінімізацію шкідливого впливу паразитних елементів схеми, досягнення максимальної простоти топології і технологічності інтегральної схеми.

1. Економія площі кристала і зручність збирання в корпус. Транзистори необхідно розташовувати на можливо меншій відстані один від одного, використовуючи для транзисторів з великою довжиною або шириною каналу зигзагоподібну, гребінчасту або інші конструкції, що займають меншу площу. Контактні майданчики (виводи) мікросхеми слід розташовувати по можливості рівномірно по периметру кристала.

Фігури суміщення розташовувати або тільки між контактними майданчиками, або між контактними площадками і лінією розрізу. Прилади захисту від статичної електрики необхідно розташовувати між контактними майданчиками або під ними. Компонування схеми рекомендується робити симетричною при наявності однакових вузлів.

З'єднувальні шини між контактними майданчиками і відповідними вузлами схеми виконують по можливості мінімальної довжини і з мінімальною кількістю перетинів з іншими шинами.

2. Мінімізація шкідливого впливу паразитних елементів схеми. Шина корпусу та струмозабезпечуючі шини живлення, а також виводи виходів схеми повинні виготовлятися лише за допомогою алюмінієвих шин. Це необхідно для виключення помітного падіння напруги на названих шинах, що погіршує режим роботи схеми і збільшує вихідний опір схеми.

Площа pn -переходів стоку та витоку повинна бути мінімально можливою, щоб паразитна ємність pn -переходу і паразитний струм на підкладку були мінімальними. Розміри контактних вікон на струмозабезпечуючих переходах повинні бути максимально можливої ширини (напрямок струму перпендикулярний до контакту по його ширині) і мінімально можливої довжини. Розміри контактних вікон на неструмозабезпечуючих шинах повинні бути мінімальних розмірів.

Довжина між'єднань і кількість перетинів між виходом попереднього і входом наступного каскаду схеми повинні бути мінімальними з метою мінімізації паразитної ємності даного вузла та підвищення швидкодії схеми.

Варто уникати перетинів алюмінієвої шини живлення, що має максимальне значення напруги, з двома поруч розташованими pn -переходами внутрішніх між'єднань схеми, щоб виключити появу паразитних транзисторів з максимально можливою напругою на затворі.

Опір дифузійних (або полікремнієвих) ділянок в колах стоку та витоку МДН-транзисторів з коротким каналом повинен бути мінімальним, а контакти (якщо вони є), повинні бути подібними до контактів на струмозабезпечуючих переходах.

3. Максимальна простота топології. Як відомо, складність топологічної інформації для даного кристала оцінюється кількістю координатних точок (тобто кутів на рисунку топології) і кількістю косих ліній (тобто ліній, розташованих по відношенню до границь кристала під кутами, відмінними від 90°). Чим складніша топологія, тим складніше виготовлення і контроль фотошаблонів схеми, а також вища імовірність появи дефектів на фотошаблоні і кристалі. Тому варто шукати оптимальний варіант між складністю топології та економією площі кристала і по можливості уникати косих ліній.

4. Технологічність. Під технологічністю розуміється забезпечення мінімальної площі кристала, мінімальна кількість типорозмірів елементів, мінімальна площа pn -переходів, мінімальна кількість перетинів алюмінієвих, дифузійних і полікремнієвих шин, розташування фігур суміщення в одній області кристала.

5.3. Конструктивно-технологічні обмеження на розробку топології мікросхеми

p-канальні МДН-транзистори з полікремнієвим затвором

Шар № 1.

1. Мінімальна ширина активної області – 10 *мкм*.
2. Мінімальна відстань між активними областями – 15 *мкм*.

Шар № 2.

1. Мінімальна ширина лінії полікремнію – 12,5 *мкм*.
2. Мінімальна відстань між лініями – 10 *мкм*.
3. Мінімальне перекриття активної області по ширині каналу – 7,5 *мкм*.

Шар № 3.

1. Мінімальний розмір контактного вікна 7,5×7,5 *мкм*.
2. Мінімальна відстань краю контактного вікна від краю полікремнієвої шини і краю активної області – 7,5 *мкм*.
3. Мінімальна відстань краю контактного вікна від краю каналу МДН-транзистора – 10 *мкм*.

Шар № 4.

1. Мінімальна ширина лінії алюмінію – 12,5 *мкм*.
2. Мінімальна відстань між лініями – 7,5 *мкм*.
3. Мінімальне перекриття алюмінієм краю контактного вікна – 7,5 *мкм*.
4. Мінімальна відстань алюмінієвого міжз'єднання від краю кристала – 50 *мкм*.
5. Мінімальна відстань активної області і алюмінієвого міжз'єднання від контактної площадки виводу – 25 *мкм*.
6. Мінімальний розмір контактної площадки – 150×150 *мкм*.

Шар № 5.

1. Мінімальна відстань від краю вікна до краю алюмінієвої контактної площадки – 10 *мкм*.
2. Мінімальна відстань активних областей кристала від лінії розрізу – 75 *мкм*.
3. Мінімальна ширина лінії розрізу – 150 *мкм*.

n-канальні МДН-транзистори з полікремнієвим затвором

Шар № 1.

1. Мінімальна ширина активної області – 8 *мкм*.
2. Мінімальна відстань між активними областями – 5 *мкм*.

Шар № 2, 3.

1. Мінімальне перекриття активної області – 5 *мкм*.
2. Мінімальне перекриття області каналу по його довжині (перекриття краю полікремнієвого затвору) – 5 *мкм*.

Шар № 4.

1. Мінімальний розмір контактного вікна – 10×10 *мкм*.
2. Мінімальне перекриття контактним вікном активної області (області дифузії) – 2 *мкм*.
3. Мінімальна відстань контактного вікна від сусіднього контактного вікна і сусідньої активної області – 10 *мкм*.
4. Мінімальне перекриття контактного вікна шаром полікремнію – 8 *мкм*.

Шар № 5.

1. Мінімальна ширина лінії полікремнію – 8 *мкм*.

2. Мінімальна відстань між лініями – 5 *мкм*.
3. Мінімальне перекриття активної області по ширині каналу – 5 *мкм*.

Шар № 6.

1. Мінімальний розмір контактного вікна – 5×5 *мкм*.
2. Мінімальна відстань краю контактного вікна від краю полікремнієвої шини і краю активної області – 5 *мкм*.
3. Мінімальна відстань краю контактного вікна від краю каналу МДН-транзистора – 8 *мкм*.

Шар № 7.

1. Мінімальна ширина лінії алюмінію – 10 *мкм*.
2. Мінімальна відстань між лініями – 5 *мкм*.
3. Мінімальне перекриття алюмінієм краю контактного вікна – 5 *мкм*.
4. Мінімальна відстань алюмінієвого міжз'єднання від краю кристала – 50 *мкм*.
5. Мінімальна відстань алюмінієвого міжз'єднання від контактної площадки виводу – 25 *мкм*.
6. Мінімальний розмір контактної площадки – 120×120 *мкм*.

Шар № 8.

1. Мінімальна відстань від краю до краю алюмінієвої контактної площадки – 10 *мкм*.
2. Мінімальна відстань активних областей кристала і областей неметалевих контактів від лінії розрізу – 75 *мкм*.
3. Мінімальна ширина лінії розрізу – 150 *мкм*.

6. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО МАРШРУТУ ВИГОТОВЛЕННЯ МІКРОСХЕМ

6.1. Основні технологічні процеси виготовлення напівпровідникових інтегральних мікросхем

При створенні різноманітних за функціональним призначенням ІМС використовується планарна технологія, що забезпечує відтворювальні параметри інтегральних елементів та групові методи їх виробництва. Локальні технологічні обробки ділянок монокристала кремнію забезпечуються завдяки застосуванню вільних та контактних масок.

В планарній технології багаторазово повторюються однотипні операції для створення різних по структурі ІМС. Це дозволяє виділити невелику кількість основних технологічних операцій і розглянути їх більш детально.

Основні технологічні операції при виготовленні ІМС, що формують інтегральний елемент, стосуються напівпровідникової структури. Їх можна звести до наступних етапів: підготовка напівпровідникової підкладки; окислення; осадження металевих, напівпровідникових чи діелектричних плівок; фотолітографія; дифузія; іонне легування.

Підготовка напівпровідникової підкладки полягає в її послідовній механічній обробці. Підкладки кремнію шліфують до заданої товщини, потім полірують, піддають травленню і промивають. Епітаксіальні структури не вимагають додаткової механічної обробки, а лише піддаються травленню і промиванню перед процесами створення схем.

Окислення. На поверхні кремнію вирощується плівка двоокису кремнію SiO_2 , яка має близький до кремнію коефіцієнт теплового розширення, що дозволяє використовувати її як надійне захисне покриття, а також як ізолятор окремих компонентів ІМС, маску при проведенні локальної дифузії і активну частину приладу в МДН-структурах.

Найбільш технологічним методом отримання плівок SiO_2 являється термічне окислення поверхні кремнію. В якості окисного середовища використовують сухий або зволожений кисень або пари води. Температура робочої зони при окисненні $1100\text{--}1300^\circ\text{C}$. Окислення проводиться методом відкритої труби в потоці окисника. В сухому кисні вирощується найбільш досконалий по структурі окисний шар, але процес при цьому проходить повільно (при $T = 1200^\circ\text{C}$ товщина шару SiO_2 складає $0,1\text{ мкм}$).

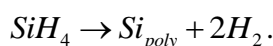
На практиці доцільно проводити окислення в три стадії: в сухому кисні, вологому кисні і знову у сухому. Для стабілізації властивостей захисних окисних шарів у процесі окислення в середовище вологого кисню або парів води додають борну кислоту, двоокис титану, п'ятиокис ванадію тощо.

Окрім термічного, використовується хімічне, анодне і плазмове окислення кремнію.

Захисні плівки SiO_2 отримують також методом іонного впровадження іонів кисню. Основною перевагою цього методу являється можливість локального нанесення плівок SiO_2 на ділянки поверхні кремнію.

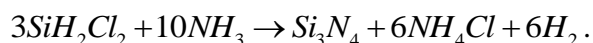
Для отримання двоокису кремнію широко застосовується піроліз кремнійорганічних з'єднань, силанів та хлоридів кремнію.

Осадження полікремнію. При осадженні полікристалічного кремнію відбувається реакція піролітичного розкладу моносилану (SiH_4) в реакторі пониженого тиску в інертному середовищі при тиску $66,7\text{ Па}$ і в діапазоні температур $580\text{...}625^\circ\text{C}$ зі швидкістю осадження порядку $5 \cdot 10^{-8}\text{ см/с}$:



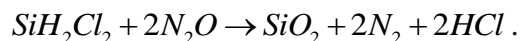
Чим вища температура у вказаному діапазоні, тим більш однорідною і дрібнозернистою виходить плівка полікремнію. Після осадження проводиться легування полікремнію домішкою за допомогою дифузії або іонної імплантації. Після легування проводиться термічна витримка плівки полікремнію в сухому азоті при температурах $900\text{...}1100^\circ\text{C}$ для зниження опору плівки.

Осадження нітриду кремнію. При осадженні нітриду кремнію в реакторі пониженого тиску (при температурі 800°C) відбувається термічна дисоціація SiH_2Cl_2 у присутності аміаку:



Процес відбувається при тиску порядку $34,7 \text{ Па}$.

Осадження двоокису кремнію. При осадженні SiO_2 в реакторі пониженого тиску відбувається термічна дисоціація SiH_2Cl_2 в присутності N_2O при тиску $13...66 \text{ Па}$ і температурі $900...950^{\circ}\text{C}$:



Якщо необхідно отримати оксид, легований фосфором (фосфоросилікатне скло – ФСС), осадження проводять у присутності POCl_3 . Осаджене ФСС стабілізує поверхню та об'єм оксиду, що знаходиться під ним за рахунок того, що воно зв'язує іони натрію в оксиді і заряджені частинки і іони різних речовин на зовнішній поверхні кристала.

Фотолітографія. Цей процес призначений для створення на поверхні підкладки захисної маски малих розмірів практично будь-якої складності, що використовується надалі для проведення локальних процесів травлення, дифузії, епітаксії і ін. Утворюється вона за допомогою фоточутливого шару (фоторезисту), який під дією світла змінює свою структуру. За здатністю змінювати свої властивості при опроміненні фоторезисти бувають негативні та позитивні.

Освітлення негативного фоторезисту викликає додаткову полімеризацію його молекул, внаслідок чого після проявлення пластини напівпровідника на ній залишаються нерозчинні ділянки рисунка, які представляють собою негативне зображення фотошаблону, а неосвітлені ділянки фоторезисту змиваються у розчині проявника.

В позитивному фоторезисті під дією світла відбувається руйнування молекул. При проявленні такий фоторезист видаляється з освітлених ділянок, а на поверхні пластини створюється позитивне зображення фотошаблону.

Фоторезист повинен бути чутливим до опромінення, мати високі роздільну здатність та кислотостійкість.

Для створення певного рисунка за допомогою фоторезисту використовується фотошаблон, що представляє собою плоскопаралельну пластину з оптичного скла, на поверхні якої міститься рисунок, за розмірами відповідний до майбутньої мікросхеми. Фотошаблон містить до 2000 зображень однієї мікросхеми.

Послідовність фотолітографічного процесу полягає в наступному.

На окислену поверхню кремнію з товщиною оксиду $0,3...0,6 \text{ мкм}$ за допомогою центрифуги наносять шар фоторезисту, який сушать спочатку при кімнатній температурі, потім при температурі $100...150^{\circ}\text{C}$.

Підкладку суміщають з фотошаблоном і опромінюють ультрафіолетовим світлом. Засвічений фоторезист проявляють, а потім промивають у деіонізованій воді. Фоторезист, що залишився, задублюють при кімнатній температурі і температурі 200°C протягом однієї години, після чого окислена поверхня кремнію відкривається у місцях, що відповідають рисунку фотошаблону. Відкриті ділянки оксиду травлять у спеціальних буферних травниках (наприклад, 10 мл HF і 100 мл розчину NH_4F у воді).

На ділянки оксиду, покриті фоторезистом, травник не діє. Після травлення фоторезист розчинюють органічним розчином і гарячою сірчаною кислотою. Поверхню пластини ретельно промивають. На поверхні кремнію залишається шар SiO_2 , що відповідає рисунку схеми.

Плазмохімічні процеси. Широку промислову реалізацію отримали наступні ПХП:

- локальне розмірне травлення різних одно- і багатошарових структур;
- видалення фоторезисту;
- осадження діелектричних шарів двоокису і нітриду кремнію.

При високочастотному або НВЧ-розряді в газовому середовищі утворюється плазма. При непружних зіткненнях електронів з молекулами газу збуджуються обертові і коливальні ступені свободи молекул. При останньому типі зіткнень утворюються іони, вільні радикали і метастабільні частинки, які беруть участь в послідовних хімічних реакціях. Основну роль в утворенні хімічно активних частинок у плазмі відіграють процеси дисоціації молекул електронним ударом. Швидкість таких процесів залежить від функції розподілу електронів за енергіями і від зіткнення електронів, а останні залежать від напруженості електричного поля в реакторі, тиску газу і частоти електромагнітного поля, що збуджує плазму, а також від конструкції реактора, розміщення пластин в ньому та їх підігріву.

Плазмохімічне травлення тонких плівок. У виробництві інтегральних схем найбільш важливу роль із процесів плазмохімії відіграє травлення полікремнію, нітриду кремнію, SiO_2 і алюмінію.

В якості газових сумішей частіш за все використовується суміш із киснем CCl_4 , SF_6 , $CF_4 + H_2$, $C_2F_6 + C_2H_2$ тощо.

При травленні кремнію продуктами первинної дисоціації молекул CF_4 в плазмі являються: CF_3 , CF_3^+ , F , CF_3^- , F^- . Аніони CF_3^- і F^- звичайно не приймають участь у процесі травлення, так як пластини знаходяться під від'ємним потенціалом по відношенню до плазми, а радикал CF_3 і іон CF_3^+ швидко взаємодіють з кремнієм.

Додавання кисню в плазму CF_4 приводить до значного збільшення швидкості травлення кремнію, а також до видалення кисню із зони реакції.

Для селективного травлення двоокису кремнію (SiO_2) на кремнії в плазму CF_4 додається водень.

На відміну від рідинного травлення плазмохімічне травлення може бути анізотропним, що досягається введенням молекулярного хлору в склад газової домішки.

Дифузія. Локальна дифузія являється одною із основних технологічних операцій при створенні напівпровідникових ІМС. Процес дифузії визначає профіль інтегральної структури і основні параметри компонентів ІМС.

Дифузія в напівпровідникових кристалах представляє собою направлене переміщення домішкових атомів у сторону зменшення їх концентрації.

Локальну дифузію проводять у відкриті ділянки кремнію за методом відкритої труби в потоці газу-носія. Температурний інтервал дифузії для кремнію становить $950...1300^\circ C$. Кремнієві пластини розміщують у високотемпературній зоні дифузійної печі. Газ-носії в кварцовій трубі при своєму русі витісняє повітря. Джерела домішки, розміщені в низькотемпературній зоні, при випаровуванні потрапляють в газ-носії і в його складі проходять над поверхнею кремнію.

Джерела домішок, що використовуються у виробництві ІМС, можуть бути твердими, рідкими і газоподібними. В якості рідких джерел використовуються хлороксид фосфору $POCl_3$ і BBr_3 . Після встановлення температурного режиму в робочу зону печі поступає кисень, що сприяє утворенню на поверхні кремнію фосфор – і борсилікатного скла. В подальшому дифузія проходить із шару рідкого скла. Одночасно шар скла захищає поверхню кремнію від випаровування і попадання сторонніх частин. Таким чином, в локальних ділянках кремнію відбувається дифузія легуючої домішки і створюються області напівпровідника з визначеним типом провідності.

Процес іонного легування. Переваги цього методу в основному пов'язані з нетепловим характером легування. До них відносяться:

- універсальність, тобто можливість введення будь-якої домішки у будь-яку тверду речовину;
- низькотемпературність, так як звичайно супутня іонному легуванню термічна витримка проводиться при суттєво більш низьких температурах, ніж термічна дифузія, що

приводить до меншої деформації профілю легування і меншої деградації границі розділу $Si - SiO_2$;

- можливість гнучкого керування розподілом домішки в усіх трьох вимірах варіацією енергії іонів, застосуванням захисних масок і скануванням пучка;
- можливість чіткого дозування домішки при легуванні за допомогою точного контролю іонного струму та часу опромінення;
- чистота домішки, що забезпечується за рахунок електромагнітної сепарації іонних пучків і вакуумних умов процесу;
- можливість легування через діелектричні і металеві плівки.

Первинним процесом при іонному легуванні являється проникнення прискорених на іонному прискорювачі іонів у речовину і їх гальмування до теплових швидкостей. В першому наближенні профіль впроваджених іонів можна вважати таким, що підлягає розподілу Гауса, параметрами якого являються середньостатистична довжина проекції пробігу R_n на перпендикуляр до поверхні пластини і середньоквадратичний розкид проєційованих пробігів.

Основними домішками, що використовуються в процесах іонного легування МДН-структур, являються бор, фосфор, миш'як.

При опроміненні кремнію іонами утворюються радіаційні дефекти (вакансії, атоми у міжвузлях, дислокації і дефекти упаковки) і навіть повна аморфізація напівпровідника, тобто повне розвпорядкування структури.

Для відновлення кристалічної структури кремнію і зменшення частки радіаційних дефектів застосовується процес післяімплантаційного термічного відпалу при температурах $600...800^{\circ}C$ (максимум $900^{\circ}C$).

Для керування положенням піку розподілу впровадженої домішки, в основному наближенням його до поверхні напівпровідника, застосовується легування через тонкі плівки оксиду або іноді нітриду кремнію (це робиться при підлегуванні каналу МДН-транзистора для зміни його порогової напруги).

Концентрація впроваджених іонів визначається дозою легування, а глибина впровадженої домішки – енергією іонів. В МДН-технології дози коливаються від сотих часток до сотень мікрокулонів, а енергія в межах $20...350 \text{ кэВ}$.

6.2. Технологічний процес виготовлення p -канальних МДН ІС з алюмінієвим затвором

Виготовлення інтегральних МДН-структур за технологічним виконанням більш просте, ніж схем на біполярних структурах, так як в перших вимагається ізоляція окремих компонентів від підкладки і з'єднання елементів схеми всередині кристалу можливе за допомогою високолегованих областей p^+ . Транзистори МДН, що використовуються у таких схемах, створюються із вбудованим каналом і з індукованим n - і p -типів.

Типова технологічна послідовність виготовлення МДН-транзистора з p -каналом полягає у наступному. В якості підкладки використовується високоомний ($2...10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) кремній з електронною провідністю. Підготовлена поверхня пластини окислюється. Перша фотолітографія дозволяє розкрити вікна в оксиді для локальної дифузії, в результаті якої формуються області витоку та стоку. Дифузія проводиться в дві стадії на глибину $1...2 \text{ мкм}$.

Друга фотолітографія проводиться для розкриття вікон під тонкий оксид ($0,1...0,15 \text{ мкм}$). Тонкий оксид вирощується на поверхні кремнію в сухому кисні при температурі $1150...1200^{\circ}C$.

Для підвищення стабільності параметрів МДН – структур на поверхню підзатворного оксиду наноситься тонкий шар ($0,01...0,02 \text{ мкм}$) фосфорсилікатного скла методом обробки оксидованої поверхні кремнію в парах P_2O_5 при температурі $1000^{\circ}C$.

Третя фотолітографія дозволяє розкрити контактні вікна під омичні контакти областей витоку та стоку, після чого, на очищену поверхню схеми наноситься алюміній. Четверта фотолітографія створює рисунок металізації схеми.

6.3. Технологічний процес виготовлення n -канальних МДН ІС з полікремнієвим затвором

В якості вихідного матеріалу використовується монокристалічний кремній з опором $4,5...40 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ типу КДБ (кремній дірковий, легований бором) з кристалографічною орієнтацією (100). Технологічна послідовність виготовлення кристалу наступна.

1. Перше окислення, товщина шару SiO_2 $0,1 \text{ мкм}$ і наступне нанесення нітриду кремнію ($0,08 \text{ мкм}$), що використовуються далі в якості маски при локальному окисненні кремнію (рис. 31, а).

2. Перша фотолітографія: формування активних областей, в яких надалі формуються транзистори, резистори і спеціальні конденсатори. Активними областями являються області з невитравленим нітридом і оксидом (рис. 31, б).

3. Іонне легування бором розкритих областей монокристалічного кремнію для виключення паразитних каналів поверхневої провідності між активними областями (рис. 31, в).

4. Локальне окислення кремнію для тієї ж цілі. При локальному окисненні клин оксиду “розмивається” під маску нітриду. Величина розмиття складає (при товщині локального оксиду $1,0...1,5 \text{ мкм}$) $0,5...1,0 \text{ мкм}$ (рис. 31, г).

5. Стравлювання нітриду кремнію і оксиду, що лежить під ним, для розкриття вихідного кремнію в активних областях (рис. 31, д).

6. Вирощування підзатворного оксиду (термічне окислення монокристалічного кремнію в сухому кисні або хлорне окислення (рис. 31, е)).

7. Друга фотолітографія: іонне легування каналу МДН-транзистора з вбудованим каналом (фосфор). В якості маски при легуванні використовується фоторезист, а саме легування проводиться через підзатворний оксид, забезпечуючи при цьому пік розподілу легуючої домішки біля границі розділу “оксид – кремній”. Після іонного легування проводиться післяімплантаційний термічний відпал пластин для усунення радіаційних порушень, що вводяться іонним легуванням (рис. 31, є).

8. Третя фотолітографія: іонне підлегкування каналу МДН-транзистора з індукованим каналом (бор). Маскування та термічний відпал такі, як і у попередньому випадку (рис. 31, ж). ПРИМІТКА. Можливий варіант n -канальної технології, в якій відсутні МДН-транзистори з вбудованим каналом, а отже, і фотолітографія №2 або операція підлегкування, а отже, і фотолітографія №3.

9. Четверта фотолітографія: формування контактних вікон під неметалеві контакти. Неметалевими вважають контакти між полікремнієм і підкладкою монокремнію або контакти між шарами полікремнію металевих перемичок (рис. 31, з). ПРИМІТКА. Можливий варіант n -канальної технології, в якій відсутні неметалеві контакти, а приведені з’єднання здійснюються із застосуванням металевих перемичок. Даний варіант технологічно простіший, але веде до суттєвих втрат площі кристала.

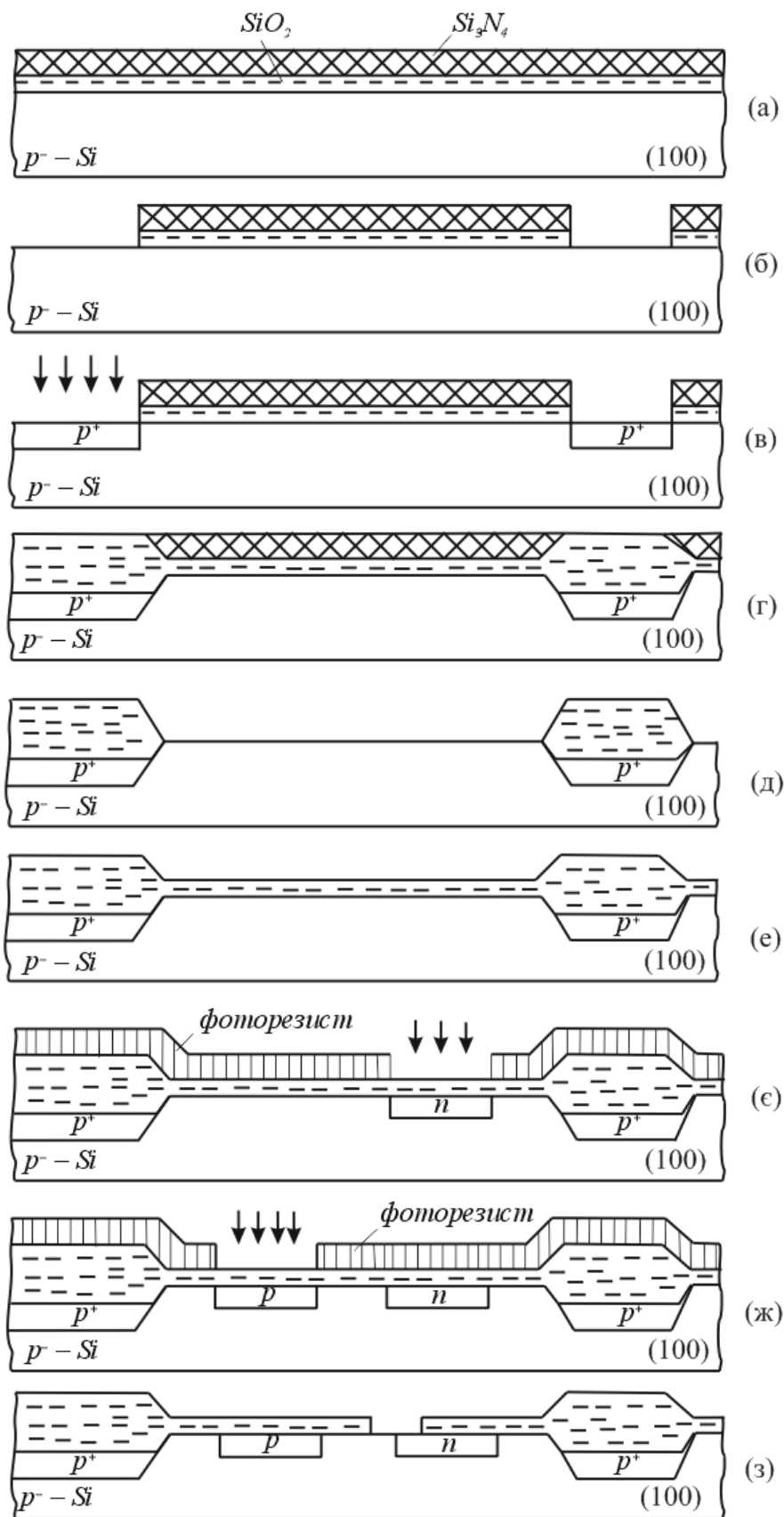
10. Нанесення полікристалічного кремнію.

11. П’ята фотолітографія: травлення полікремнію (хімічне або плазмохімічне) для формування рисунка затворів і полікремнієвих міжз’єднань. В області неметалевого контакту полікремній лягає на монокремній підкладки (рис. 31, и).

12. Травлення оксиду в областях, незахищених полікремнієм. В активних областях оксид стравлюється до монокристалічного кремнію підкладки, тобто тут також реалізується технологія з “самоформуючим” затвором (рис. 31, і).

13. Дифузія фосфору, формування стокових і витікових областей МДН-транзистора і дифузійних міжз’єднань. В області неметалевого контакту при легуванні полікремнію

домішка проходить через полікремній і легує монокристалічний кремній підкладки, що лежить під ним (рис. 31, і). ПРИМІТКА. Можливі варіанти n -канальної технології, в яких замість дифузії застосовується іонне легування. В якості дифузанта поруч із фосфором може використовуватись миш'як.



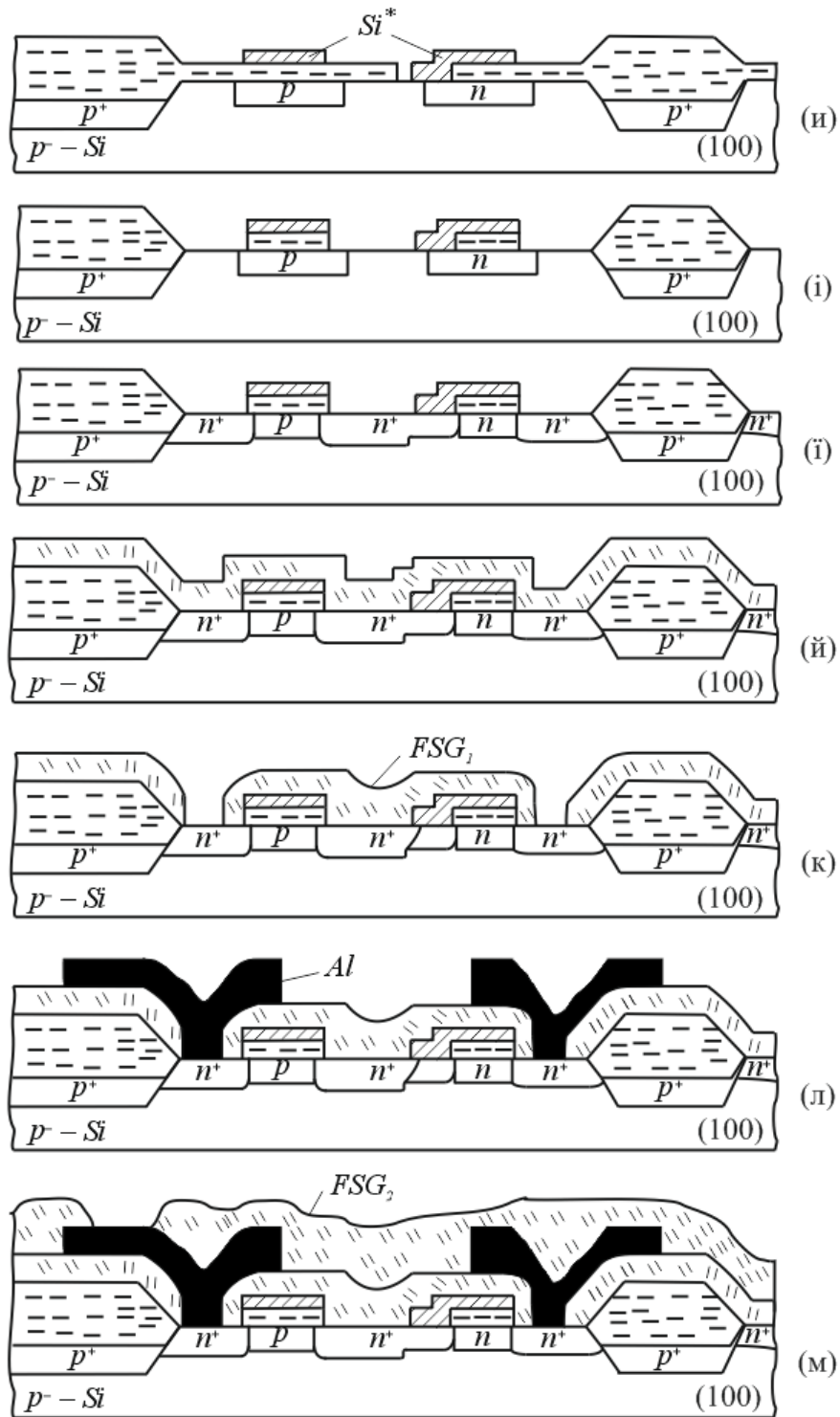


Рис. 31.

14. Нанесення фосфорсилікатного скла для створення міжшарової ізоляції (рис. 31, й).
15. Шоста фотолітографія: формування контактних вікон (рис. 31, к).
16. Осадження плівки алюмінію.
17. Сьома фотолітографія: формування алюмінієвих міжз'єднань (рис. 31, л).
18. Нанесення захисного оксиду.
19. Восьма фотолітографія: формування вікон на контактних майданчиках (рис. 31, м).

Після створення активних і пасивних елементів інтегральної схеми необхідно забезпечити з'єднання між ними. Для цієї цілі знову проводять окислення поверхні пластини і в шарі двоокису кремнію витравлюють "вікна", де необхідно робити контакти до кожного із

елементів схеми. Потім на поверхню пластини вакуумним осадження наносять тонке металеве покриття. В якості металу звичайно використовують алюміній, що має хорошу адгезію з оксидом кремнію, а також надійний омичний контакт як з n -, так і p -областями в кремнії. Після цього методом фотолітографії формують схему з'єднань між елементами напівпровідникової мікросхеми. Непотрібні ділянки алюмінієвого покриття стравлюють, після чого залишаються тільки з'єднувальні лінії між транзисторами, резисторами і діодами.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Интегральные схемы на МДП-приборах. Пер. с англ. / Под ред. И.Н. Кармазинского. – М.: Мир, 1975.
2. Ефимов И.Е., Горбунов Ю.И., Козырь И.Н. Микроэлектроника. – М. : Высш. шк., 1978.
3. Николаев И.М., Филинюк Н.А. Микроэлектронные устройства и основы их проектирования. – М.: Энергия, 1979.
4. Богдан Г.И., Некрасов М.М. Пленочная электроника и полупроводниковые интегральные схемы. – Киев: Вища школа, 1979.
5. Yannis Tsididis, Colin McAndrew. Operation and Modeling of the MOS Transistor. - Oxford University Press, USA; 3 edition, 2010.
6. David Esseni, Pierpaolo Palestri, Luca Selmi. Nanoscale MOS Transistors. - Cambridge University Press, 2011.

ДОДАТОК 1. ПРИКЛАД ОФОРМЛЕННЯ ТИТУЛЬНОГО АРКУШУ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

Кафедра мікроелектроніки

КУРСОВИЙ ПРОЕКТ (РОБОТА)
з дисципліни "Твердотільна Електроніка - 2"

Назва теми: _____

Керівник _____

"Допущений до захисту"

(особистий підпис керівника)

Захищений з оцінкою _____
(особистий підпис) (ПІБ)

(особистий підпис) (ПІБ)

(особистий підпис) (ПІБ)

Виконав

Студент

Група _____

Залікова книжка № _____

(особистий підпис)

Київ

2014

ДОДАТОК 2. ПРИКЛАД ОФОРМЛЕННЯ ОСНОВНОГО НАПИСУ ЛИСТІВ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Лист змісту

					ДП51.5110.021.001.ПЗ			
					Пояснювальна записка	Літера	Аркуш	Аркушів
Зм	Літ.	№ докумен	Підпис	Дата		К	1	25
Розроб.	Дудко А.Б.					НТУУ "КПІ", кафедра мікроелектроніки		
Перевір.	Сімчук Б.В.							
Т. конт.								
Н. конт.								
Затверд.								

Листи пояснювальної записки

					ДП51.5110.021.001.ПЗ		Аркуш
							5
Зм	Літ.	№ докумен	Підпис	Дата			

Лист топологічного креслення

					ДП51.5110.021.001.ТК					
					Топологічне креслення	Літера			Маса	Масштаб
							К			500 : 1
Зм	Літ.	№ докумен	Підпис	Дата		Аркуш 1			Аркушів 1	НТУУ "КПІ", кафедра мікроелектроніки
Розроб.	Дудко А.Б.									
Перевір.	Сімчук Б.В.									
Т. конт.										
Н. конт.										
Затверд.										

Листи фотошаблонів

					ДП51.5110.021.001.ФШ					
					Фотошаблон	Літера			Маса	Масштаб
Зм	Літ.	№ докумен	Підпис	Дата	Фотошаблон		К			500 : 1
Розроб.	Дудко А.Б.									
Перевір.	Сімчук Б.В.									
Т. конт.										
						Аркуш	1	Аркушів	1	
Н. конт.					Металізація	НТУУ "КПІ", кафедра мікроелектроніки				
Затверд.										

ЗМІСТ

1. ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ЩОДО ВИКОНАННЯ, ОФОРМЛЕННЯ ТА ЗАХИСТУ КУРСОВОЇ РОБОТИ.....	3
1.1. Зміст і оформлення пояснювальної записки курсової роботи	4
1.2. Зміст та оформлення графічної документації курсової роботи	5
2. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПОРОГОВОЇ НАПРУГИ МДН-ТРАНЗИСТОРА	7
2.1. Розрахунок порогової напруги МДН-транзистора з індукованим каналом.....	7
2.2. Розрахунок порогової напруги МДН-транзистора з вбудованим каналом.....	10
2.3. Розрахунок ємностей МДН-транзистора і елементів конструкції.....	12
3.МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЛОГІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА МДН-ТРАНЗИСТОРАХ.....	19
3.1. Розрахунок МДН-інверторів на основі струму через навантаження.....	19
3.2. Розрахунок МДН-інверторів на основі динамічних характеристик.....	23
4. РОЗРАХУНОК І ТИПОВІ КОНСТРУКЦІЇ ЗАХИСНОГО ПРИСТРОЮ МІКРОСХЕМИ ВІД СТАТИЧНОЇ ЕЛЕКТРИКИ	30
5. ПОБУДОВА ТОПОЛОГІЧНОГО ЗОБРАЖЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНОЇ МІКРОСХЕМИ НА ОСНОВІ МДН-ТРАНЗИСТОРІВ	34
5.1. Побудова топології МДН-транзисторів та вузлів ІМС.....	34
5.2. Рекомендації щодо компонування топології мікросхеми.....	38
5.3. Конструктивно-технологічні обмеження на розробку топології мікросхеми.....	39
6. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО МАРШРУТУ ВИГОТОВЛЕННЯ МІКРОСХЕМ.....	41
6.1. Основні технологічні процеси виготовлення напівпровідникових інтегральних мікросхем.....	41
6.2. Технологічний процес виготовлення p -канальних МДН ІС з алюмінієвим затвором..	44
6.3.Технологічний процес виготовлення n -канальних МДН ІС з полікремнієвим затвором.....	45
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	49
ДОДАТОК 1. ПРИКЛАД ОФОРМЛЕННЯ ТИТУЛЬНОГО АРКУШУ.....	50
ДОДАТОК 2. ПРИКЛАД ОФОРМЛЕННЯ ОСНОВНОГО НАПISУ ЛИСТІВ КУРСОВОЇ РОБОТИ.....	51